#3

ISSN 0338—9781

#3

BULLETIN OF
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING

No. 3 March 1982

水産工学研究所報告

第3号

昭和57年3月

LIBRARY
AUG 25 1982
National Marine Fisheries Service
2570 Dole Street
Honolulu, Hawaii

水　産　庁
水　産　工　学　研　究　所
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING
FISHERIES AGENCY

Digitized by the Internet Archive
in 2025

https://archive.org/details/bulletin-of-national-research-institute-of-fisheries_1982-03_3

水産工学研究所報告　第3号

目　次

海峡流の流況特性に関する研究 ……………………………………………中村　充…… 1
——鳴門海峡——　乃万　俊文

後流中の物質分散に関する研究……………………………………………杜多　哲……13
——濃度を指標としてみた後流域の特性と交換率の評価——

内部落下流に関する実験的研究……………………………………………乃万　俊文……25
中村　充

MAC法による非定常密度流のシミュレーション ……………………………武内　智行……41

水産増養殖施設の水力学的研究……………………………………………上北　征男……67

直立消波工の波圧減殺効果に関する基礎的実験…………………………山本　正昭… 101

遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究………………………西　裕司… 127
山本　正昭

一般応力下での異方正規圧密粘性土の応力～ひずみ関係…………………大槇　正紀… 143

漁船機関における乳化燃料の使用について—Ⅰ …………………………小田　健一… 173
——乳化燃料使用時の機関の運転性能——　山田　敏夫

魚体反射率測定における同時較正法…………………………………………宮野鼻洋一… 187
石井　憲
古沢　昌彦

事故網の破網特性……………………………………………………………下崎　吉矩… 195
西田　進
武富　一

スキャンニングソナーによる定置網に対する魚群行動調査の試み………田原　陽三… 213
井上　喜洋
森　敬四郎

平面網地の流水抵抗に関する研究Ⅰ ………………………………………大沢　要一… 227
——網地抵抗測定装置の試作と貫通式　森　敬四郎
無結節平面網地の流水抵抗の測定結果について——　田原　陽三

カニ刺網の構造と漁獲性能に関する研究……………………………………笹川　康雄… 239

BULLETIN OF
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING

No. 3

Contents

Makoto NAKAMURA and Toshifumi NOMA
On the Jet Flow Characteristics of Naruto Strait ········· 1
Satoru TODA
On the Characteristics of Water Exchange in the Wake ········· 13
Toshifumi NOMA and Makoto NAKAMURA
Experimental Study on Internal Fall ········· 25
Tomoyuki TAKEUCHI
Mumerical Study on Unsteady Density Flows
by the Modified MAC Method ········· 41
Yukio UEKITA
Hydraulic Studies on the Aquacultural Facilities ········· 67
Masaaki YAMAMOTO
Fundamental Experiment Study on Decreasing Effect
of Wave Pressure by Vertical-Face Absorber ········· 101
Yuji NISHI and Masaaki YAMAMOTO
Experimental Study on Overtopping over Seawall
Having Remote Absorber ········· 127
Seiki OHMAKI
A Stress-Strain Relationship of Anisotropically, Normally Consolidated
Cohesive Soil under General Stress Condition ········· 143
Ken'ichi ODA and Toshio YAMADA
Burning of Oil/Water Emulsified Fuel on Fishing Boat Engine— I ········· 173
Yoichi MIYANOHANA, Ken ISII and Masahiko FURUSAWA
Simultaneos Calibration Method for Measurements
of Target Strength of Fish ········· 187
Yoshinori SHIMOZAKI, Susumu NISHIDA and Hajime TAKETOMI
On the Breaking Properties of Defective Fishing Gear Webbings ········· 195
Yozo TAWARA, Yoshihiro INOUE and Keishiro MORI
A Trial for Observing with Scanning Sonar Fish Behavior toward Set Net··· 213
Yoichi OSAWA, Keishiro MORI and Yozo TAWARA
Studies on Resistance of Plain Net against Flow of Water I
On the Experimental Apparatus for Measurement of Hydraulic Resistance of
Plain Net and Result of the Experiment Determined by the Apparatus ········· 227
Yasuo SASAKAWA
Studies on Fishing Efficiency in Relation to Structure of
King Crab Tangle Nets ········· 239

水工研報告　3
1982　p.p. 1～12

海峡流の流況特性に関する研究

――鳴門海峡――

中村　充* ・乃万俊文*

目　次

1．はじめに……1
2．調査方法……1
3．調査結果と考察……1
　3.1　内外水位差の特性と海水交流・交換……1
　3.2　流　況……4
　3.3　噴流による海水混合……7
4．あとがき……7
　参考文献……11
　Summary……12

1.　はじめに

噴流に関する研究は従来から多くの研究があるが，その多くはスケールの小さな平面流に関するものであり，海峡流のような大スケールのものは少ない。筆者らは本州四国架橋事業に関連して鳴門海峡の調査を行なう機会を得た。その結果興味深い現象を観測したので若干の解析を行なってここに報告する。

2.　調査方法

図1に鳴門海峡の平面図と観測点を示す。①　潮位観測は図1のA（播磨灘側）およびB，C（紀伊水道側）点においてS 54.7.27～7.30の3日間およびS 55.11.1～11.16の15日間連続同時記録をとった。C点福良は常設検潮所であり，A点亀浦は水圧式検潮器を用いた。B点はS 55年には観測しなかった。②　流跡線観測はS 54.7.29に7時50分から約4 hr北流時に16個の海流板を用いて流跡線観測を行なった。この調査は淡路側に形成される反流域に主眼を置いて行なった。③　潮流観測は北流々軸末端付近のSt. 1（Lat. 34°17′32″，Long・134°36′50′′）においてアンデラー流速計（ベルゲンモデル4）を用い，St. 1では海面下5，15，25，35m層で，St. 2では海面下5，15，25，35mの点で流速，流向，水温，塩分の記録を1分間隔で50時間の連続観測を行なった。St. 1，St. 2は北流時の海峡噴流で生じた鉛直混合が収まって成層流に移行すると思われる付近として定めた。④　海峡流速は海峡中央100m区間を流れに沿って船が往復する時間より求めた。

3.　調査結果と考察

3.1　内外水位差の特性と海水交流・交換

海峡南側C点の潮位は紀伊水道の潮波が直ちに伝播するのに対し北側A点では潮波が友ケ島水道，大阪湾，明石海峡，播磨灘と伝達する間に遅れを生じC点福良の潮位に対しA点（亀浦）の潮位は約6時間，位相角が半日潮に対しπだけ遅れている。これが鳴門の強い海峡流を生じている原因である。

3.1.1　昭和54年度観測結果の解析

図2にS 54度調査の潮位曲線を示す。位相差と潮候の

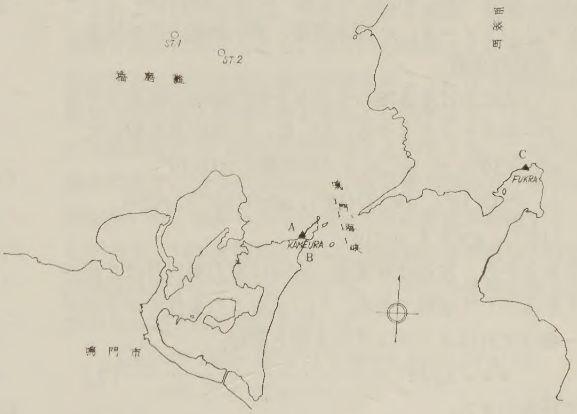


図　1　調査位置図
Location of investigation

---

* 水産土木工学部

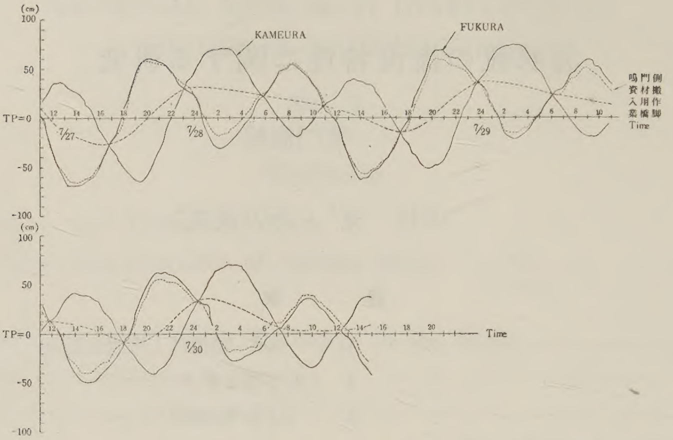


図 2 潮位曲線

Tide curve（1979）

日潮不等の関係で転流時および転流時潮位が変動し図2の記録では転流時間間隔は南流が北流より1時間長く海峡南北の一転流期間における最大水位差Δh_{max}は，北流時0.68〜1.22m，南流時0.88〜1.01mで北流時の変動幅が大きい。平均すると北流時0.94m，南流時0.96mである。海峡内外の水位差Δhを最大水位差Δh_{max}で，潮時を転流時間間隔t_rで無次元化して示すと図3のようになり変化の型は一様と見ることができる。

海峡内外水位差を用いて海水交流量を求める。海峡流の運動方程式は，

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=fv-\frac{1}{\rho}\ \frac{\partial}{\partial x}\cdot(\rho g\Delta h)+\nu\nabla^2 u \quad \text{etc.}\cdots\cdots(1)$$

である。ここにx，y，z；流軸方向，流軸に水平に直角方向，鉛直方向，u，v，w；x，y，z 方向流速，f；コリオリパラメータ，ρ: 海水密度，Δh; 海峡内外水位差，ν：動粘性係数

（1）式における各項の大きさを鳴門海峡の条件下でオーダーエスチメイトする。M，K，S 単位系を用いて，

$u\simeq O(10^0)$，v，$w\leq u$，t（半日潮）$\simeq O(10^4)$

x，$y\simeq O(10^2)$，$\Delta h\simeq O(10^0)$，$\nu\simeq O(10^{-2})$，$f\simeq O(10^{-5})$，$g=9.8$，$\rho=10^3$

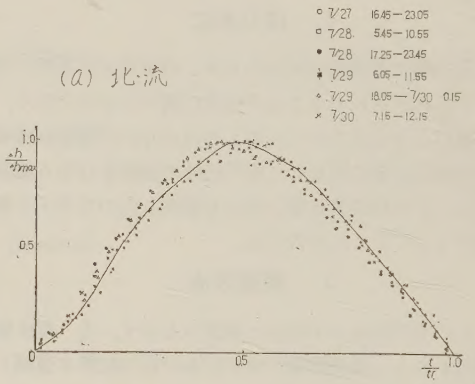
であるから，左辺は移流項，右辺は重力項以外は2桁〜5桁落ちして省略できる。（1）式をこの条件でエネルギー積分すればオリフィスの水理と同様，

$$u=\sqrt{2g\Delta h}\cdots\cdots(2)$$

で計算できる。

海峡流心の流速は本四公団の船で海峡狭窄部を流軸に沿って一定推力で100m区間を往復し上り，下りの所要時間を計測して求めた。この結果を表1に示す。

(a) 北流



(b) 南流

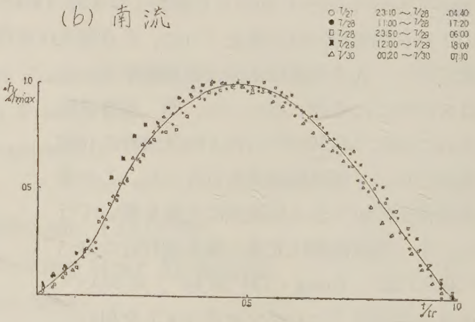


図 3 無次元潮位差

Adimensional tidal range

潮流観測時の水位差Δhを図2より求め式（2）による計算値と対比したのが図4である。最強流時に実測値が理論値をわずかに越えているが，これは表1の実測値は海峡部で海峡流の最縮流部でないので，接近速度水頭等の影響によると考えられる。（2）式と実測値の比は流速

係数C_vを与えることになり，図より$C_v=0.93$程度である。縮流係数C_aの実測はできなかったが，狭窄部を通る流れでは0.8程度である。

$$q=CA\sqrt{2g\Delta h}$$

である。ここにAは海峡部通水断面積。

転流間隔t_r期間の南流または北流量Q_S，Q_Nは次のように求まる。

$$Q=\int_0^{t_r}C_aAudt=C_aAu_{max}t_r\int_0^{t_r}\frac{u}{u_{max}}\ \frac{dt}{t_r}$$

$$=C_aAu_{max}\ t_r\int_0^1\sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta h_{max}}}dt_R \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

ここにC_aは縮流係数，$t_R=t/t_r$，Aは海峡部通水断面積（34,200m^2）。(4)式の積分項は図3における曲線に囲まれた面積であり，南流および北流について，それぞれ

$$S_s=0.711,\quad S_N=0.709$$

u_{max}は(4)式から

$$u_{max}=C_v\sqrt{2g\Delta h_{max}}$$

として計算できる。流量係数$C=C_aC_v=0.75$程度であるから(4)式は，

$$\left.\begin{array}{l}Q=CAt_rS_r\sqrt{2g\Delta h_{max}}\\ C=0.93C_a\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

t_r，Δh_{max}に観測データの平均値を用いれば，

	南　流	北　流
t_r	392分	348分
Δh_{max}	0.96m	0.94m

であるから1回の南流，北流時の移流量は，

$$\left.\begin{array}{l}Q_s=2.11C_a\times10^9\mathrm{m}^3\\ Q_N=1.85C_a\times10^9\mathrm{m}^3\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

よって移流交換量Q_{EX}は

$$Q_{EX}=Q_S-Q_N=0.26C_a\times10^9\mathrm{m}^3/1\text{干満}$$

$$=0.52C_a\times10^9\mathrm{m}^3/\text{日}$$

$$=0.42\times10^9\mathrm{m}^3/day(C_a=0.8)$$

である。この値は極めて大きな値であり，1日当り約5億トンの海水が鳴門海峡を通して播磨灘から紀伊水道へ流出することになる。この値は明石海峡からの交換量にも劣らない。明石海峡に対し14%の通水断面に過ぎない鳴門海峡が瀬戸内海の海水交換に大きく寄与していることになる。

3.1.2 昭和55年度観測結果の解析

昭和54年度調査から南流が卓越し大きな移流交換が見られたが，これが単なる観測期間中の現象であったのかどうか年間を通しての考察をするために55年度の調査を行なった。15日間の潮候曲線から調和分解を行なった結果を表2に示す[1]。

表 1　海峡流速測定結果

Observed flow velocity and difference of water level

測定年月日：昭和54年7月28日

時　間	潮流実測値	Δh	計算流速
	m/s	m	m/s
6：52	2.00	0.34	2,581
7：22	2.62	0.52	3.192
7：52	3.31	0.61	3.458
8：22	3.60	0.70	3.704
8：31	3.92	0.74	3.808
8：52	3.76	0.70	3.704
9：22	2.95	0.56	3.313
9：52	2.94	0.41	2.835
10：22	2.08	0.25	2.214

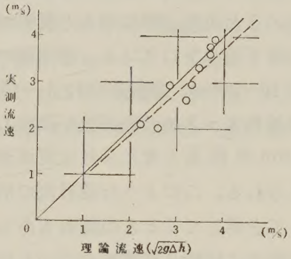


図4　理論流速と実測流速

Comparison of theoretical and observed flow velocities

これより四季の塑望，両弦における福良，亀浦の潮候曲線を画けば図5となる。図5から四季および塑望，両弦の無次元潮位差図を画けば図6のようになり水位差の変化の形は図3同様一様と見ることができる。このことから移流量は(5)式で計算することができる。この値を表3に示す。表3のΔh_{max}，t_rは日潮不等における平均値を用いた。表から全年に亘って常に南流が卓越することが判る。54年度観測と殆んど同時期の夏季塑望の移流交換量は若干小さくなっている。1年間の移流交換量を求めると表3の平均値を用いて，

$$Q_{EX}=0.093\times10^9\mathrm{m}^3/1\text{干満}=0.232\times10^9\mathrm{m}^3/\text{日}$$

$$=6.77\times10^{10}\mathrm{m}^3/\text{年}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

である。

速水・宇野木[2]が塩分拡散から求めた明石海峡を通しての交換量7×10^{10}m^3/年，中村・萩野[3]による瀬戸内海潮位シミュレーションによる移流交換量7.95×10^{10}m^3/

年に匹敵する海水交換が鳴門海峡で単に移流交換のみによって行なわれていることになる。このことは淡路島を反時計廻りに恒流が存在することを示唆しているように考えられる。更に大西外明[4]らによるCoherent 渦理論による交換を考慮すれば更に大きな海水交換が期待されることになる。また明石海峡の14%に過ぎない鳴門海峡が直接には播磨灘の浄化，ひいては瀬戸内海の浄化に大きな役割を果していることが云える。

3.2　流　況

図7に海流板追跡の一例を図8に各時刻別の海流板軌跡を示す。潮時は図2中の29日に対応する。図7中Ⅳの流跡は流軸を横断している。これは強い湧昇流域の縁辺沿いに淀みながら流れたもので平均流による流跡を意味しない。海峡流における著じるしい特徴は盛大な湧昇流の発生である。図9に海峡の深浅地形および海面流況を示す。図中の湧昇域は発生初期の優勢なもので消滅間近いものを含めると流軸近傍は殆んど湧昇域で隣接湧昇域との境界で降下流が生じている。湧昇流の規模は目視であるが直径20〜200m，継続時間は3〜15分程度であり湧昇流速は波長2〜3mの表面波が砕波していることから1.5〜2.0m/S程度と考えられ主流流速と同じ程度であると考えられる。このような湧昇流の形成について，渦糸に沿って上昇してくるとの説明もあるが[4]，噴流の場合渦糸は海底に接続せず噴流の周辺を取りまく形も考えられる。筆者は噴流とその周辺水域との間に生じると考えて考察して見る[5]。

海峡上流側の流れはポテンシャル流に近いと考えられるので海峡近辺を越えて著じるしい攪乱を受けるまでは（2）式すなわちベルヌイの定理が成立って，

$$\frac{u^2}{2g}+H=E \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

ここに，Hは動水圧水頭（$=p/\rho g+z$），Eはエネルギー水頭である。いま噴流の yz 平面内に u の大きな変化のある場合，

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{u^2}{2g}\right)=-\frac{\partial H}{\partial s}$$

この動水圧勾配で s 方向の流れ v'_s が生じ，u_a，u_b なる

表 2　15昼夜潮汐調和常数表

Tidal harmonic constants

地名 ＼ 分潮名		亀浦		福良	
		振幅	遅角	振幅	遅角
		cm	℃	cm	℃
日月合成日周潮	K_1	25.1	225.1	20.5	187.1
主太陰日周潮	O_1	18.5	195.1	15.5	171.1
主太陽日周潮	P_1	8.4	225.1	6.8	187.1
主太陰楕率日周潮	Q_1	3.6	180.2	3.0	163.2
主太陰半日周潮	M_2	33.6	337.0	41.3	186.1
主太陽太日周潮	S_2	12.4	2.4	21.9	210.4
日月合成半日周潮	K_2	3.4	2.4	6.0	210.4
主太陰楕率半日周潮	N_2	6.5	156.3	8.0	173.0
倍潮	M_4	0.9	274.7	0.1	164.2
複合潮	MS_4	0.9	222.7	0.3	245.9
平均水面	A_0	−12.4		−13.1	

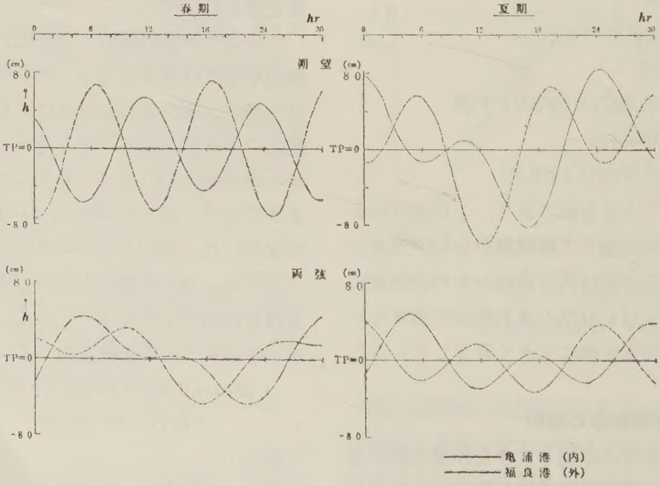


図 5　潮候曲線

Tide curve (calculation)

表 3　四季の移流量Qおよび移流交換量QE_{EX}（Q_{EX}は南流を正とする）

Interchange and exchange flow

流況 季別		南	流		北	流		移流交換量 $Q_{EX}(10^9\mathrm{m}^3)$
		ΔH_{max}(m)	$t_r(h_r)$	$Q(10^9\mathrm{m}^3)$	ΔH_{max}(m)	$t_r(h_r)$	$Q(10^9\mathrm{m}^3)$	
春（秋）	朔　望	1.14	6.16	2.99	1.13	6.13	2.96	0.036
	両　弦	0.42	6.55	1.93	0.38	6.24	1.75	0.186
夏（冬）	朔　望	0.98	6.23	2.81	0.95	6.04	2.67	0.135
	両　弦	0.54	6.28	2.10	0.50	6.21	1.99	0.107

流速をもつ流点a，b間において，

$$\partial H=\int_a^b\frac{\partial H}{\partial s}ds=-\int_a^b\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{u^2}{2g}\right)ds=\frac{1}{2g}$$

$$\times(u^2{}_a-u^2{}_b)$$

$$u_a>u_b$$

いま∂Hなる水頭差が$a\ b$間でT時間継続してv_sなる流速を生じたとすると$a\ b$間の距離lの間に運動量則を適用して（図10参照）

$$T=(\rho g\partial H-\rho v'^2{}_s)=\rho l v'_s$$

$$v'_s=\sqrt{\left(\frac{l}{2T}\right)^2+\frac{u^2{}_a-u^2{}_b}{2}}-\frac{l}{2T}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

(11)式に示す変動流速が発することになる。鉛直方向の変動流速w'で考えれば前述のように湧昇流継続時間$T=$3～15分，鉛直方向の長さは海峡部水深$l=70$m 程度であるから，

$$w'=\sqrt{\frac{u_a{}^2-u^2{}_b}{2}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

なる湧昇流が発生する。この値は交流流速u_aに比較し得る値であり大きな湧昇流の発生が起ることが説明される。海峡通過時の地形特性から噴流内に流速分布が生じれば(11)又は(12)式の湧昇流の発生が考えられ，ちなみに$u_a=3\mathrm{m}/s$の場合に$u_b=0$として見ると$2\mathrm{m}/s$程度の湧昇流が生じることになり観測に近い値が発生する。このような混合が起れば漸次周辺海域へ運動量が分散していく。

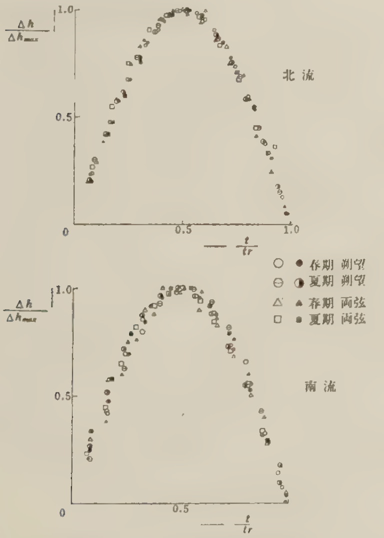


図 6　無次元潮位差図

Adimensional tidal range (calculation)

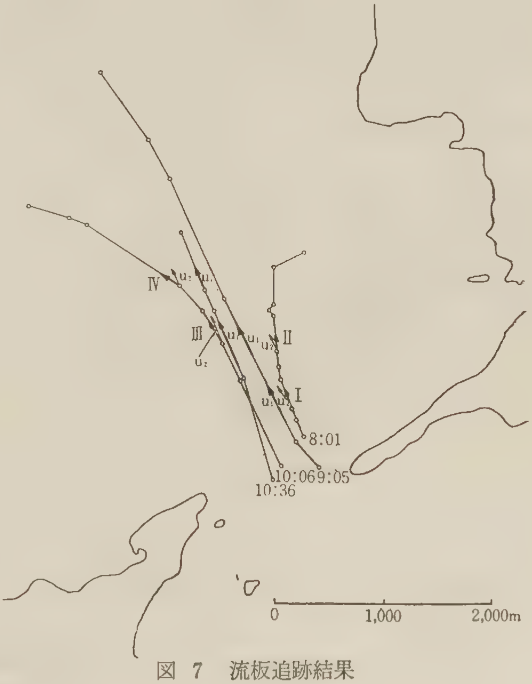


図 7　流板追跡結果

Trajectory of float

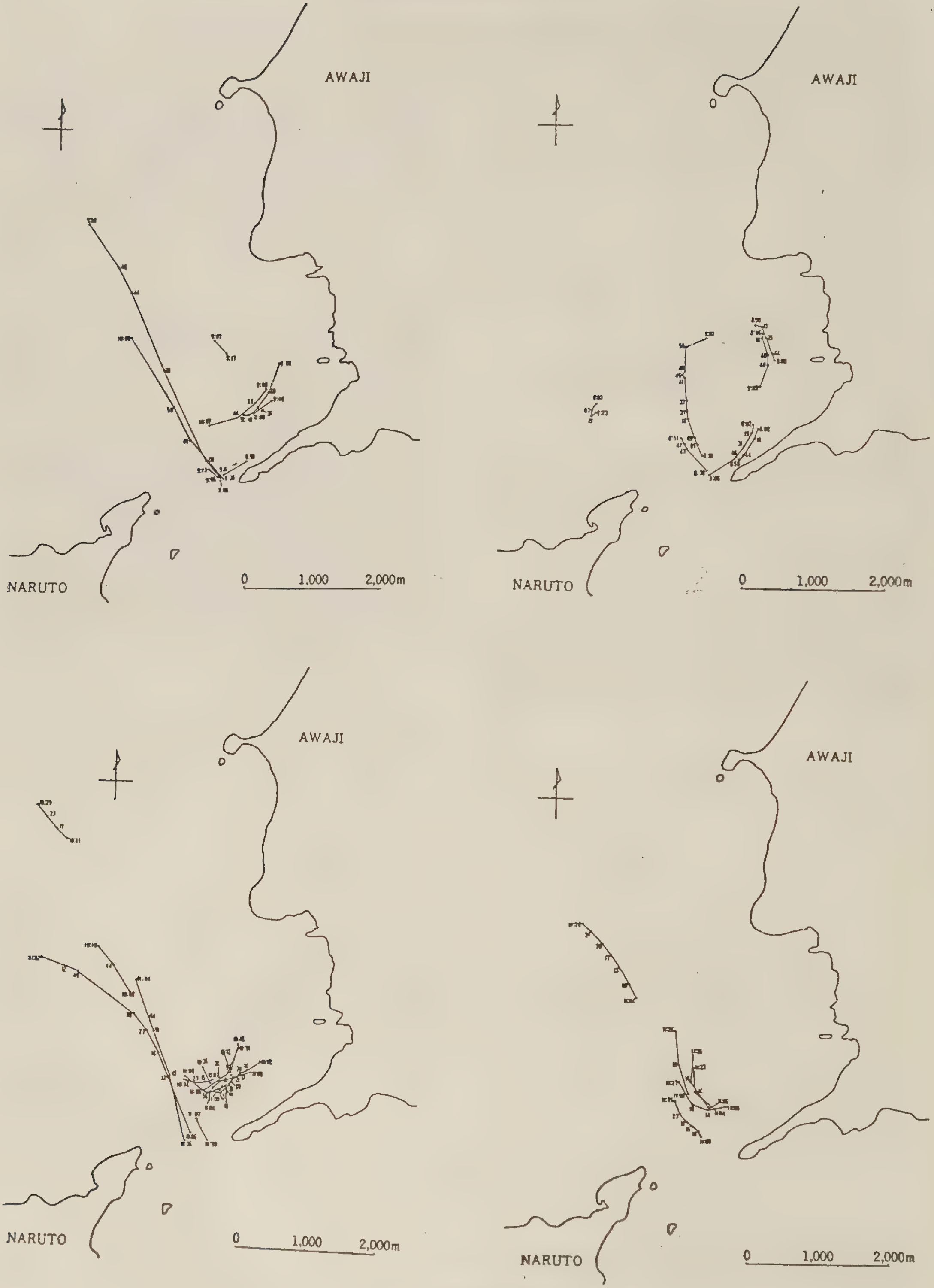

AWAJI
NARUTO
0
1,000
2,000m
AWAJI
NARUTO
0
1,000
2,000m
AWAJI
NARUTO
0
1,000
2,000m
AWAJI
NARUTO
0
1,000
2,000m

図 8 潮流板追跡結果
Trajectories of float

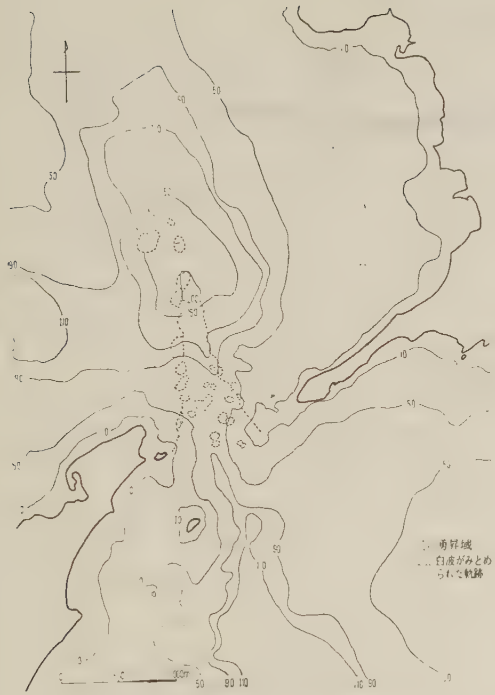


図 9　深浅地形および海面流況
Bathygraph and configuration of up-welling

3.3 噴流による海水混合

St. 1，St. 2 における流速，流向，水温，塩分の記録の一例を図11に示す。水温，塩分は12時間毎に不連続的に変化し播磨灘，紀伊水道が水塊として交互に表われているが時間周期の中で時折連続して水塊の交代が行なわれ噴流流勢の強弱による流心の変動を受けている。また図12は流速のパワースペクトルの一例であり，低周波領域に浮力領域が現われている。このことは海峡流によって受けた海水混合による新密度水塊が噴流から受けたエネルギー供給を成層下のポテンシャルとして一部移行していることを示す。このような観点から混合水が何程の深さに成層流として浸入するかを求めると，St. 1 では15m～25m層に，St. 2では5～15mと35m層に成層流を形成していることが判る。この成層移行流は位置のエネルギーをもっているので残留慣性によるのみでなく播磨灘奥に向って流動することが可能な流れであり水交換を増大させる。なお図中のピークスペクトルと記入した周期は播磨灘における鳴門―家島を節線とする単節静振と播磨灘を円形と見なしたときの単節同心円静振の合成静振周期35分と一致している（表層－5m記録)。St. 1，St. 2 のパワースペクトルを図13，(a)(b)に示す。

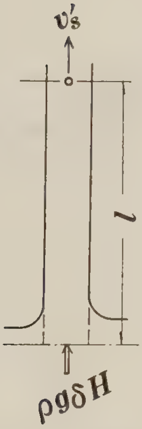


図 10　変動圧力の変動流速への転換
Schematic presention of pressure change transfer to velocity change

4.　あとがき

以上鳴門海峡における北流を中心とした調査から若干の結果とその考察を述べた。要約すると

①　鳴門海峡における交流量は南流が卓越し $8.5\times10^{10}\text{m}^3$/年 の移流交換量があり，これだけ播磨灘の水が鳴門を通して紀伊水道に流出する。この値は明石における交換量（速水・宇野木，中村・萩野）に相当する。

②　噴流域に生じる優勢な湧昇流について噴流周縁との速度場の変化による圧力場の変換によって生じるとしてオーダーを調べた。

③　海水混合によって生じる新水塊の形成とその成層流への移行水深を求めた。

等であり，詳細には更に観測値を解析することによって平面的反流域の形成や，地形的な速度場の変化の原因，成層移行流による海水交換等々に関する知見を求めることも可能であろう。最後に観測の機会を与えて頂き，御協力願った本州四国架橋公団，観測に協力願ったアジア航測kkの方々に御礼申し上げる。

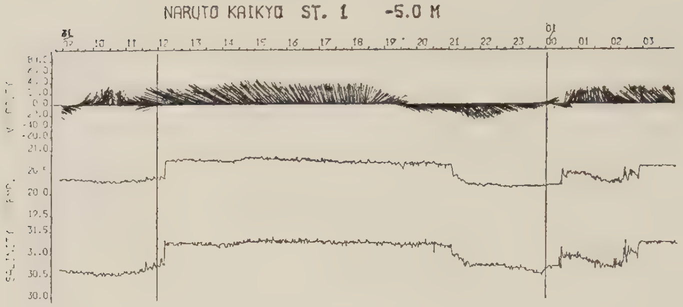


図 11 観測記録の一例
Example data of observations

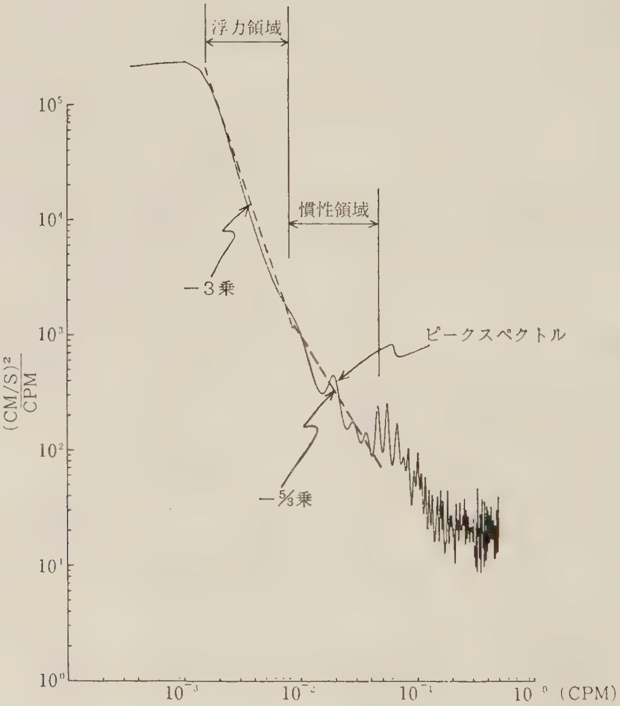


FIG. POWER SPECTRUM OF
N-COMP. OF CURRENT VELOCITY
ST.1 −5 m

図 12 パワースペクトルの一例
presentation of power spectrum

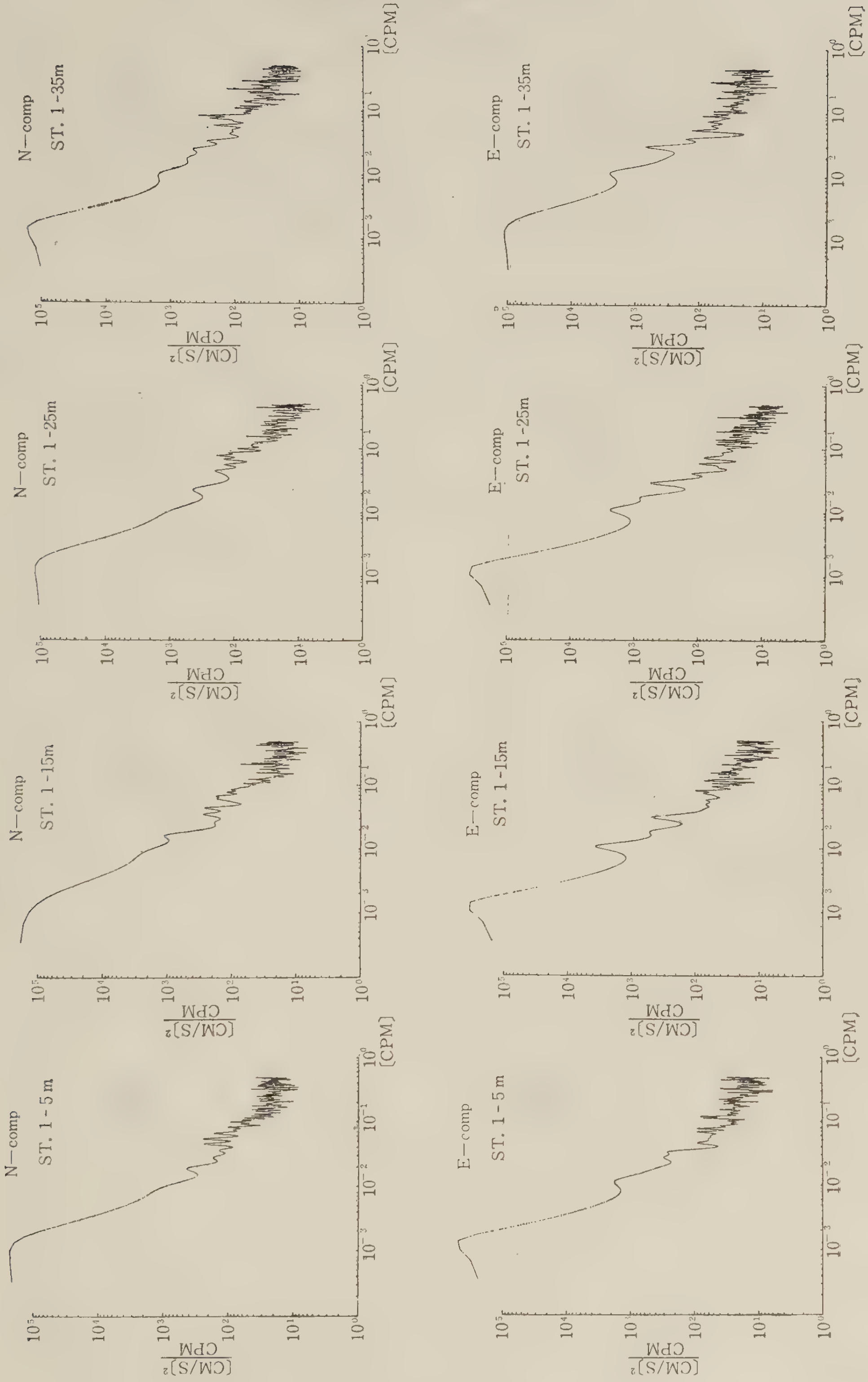


図 13 パワースペクトル
Power spectrums

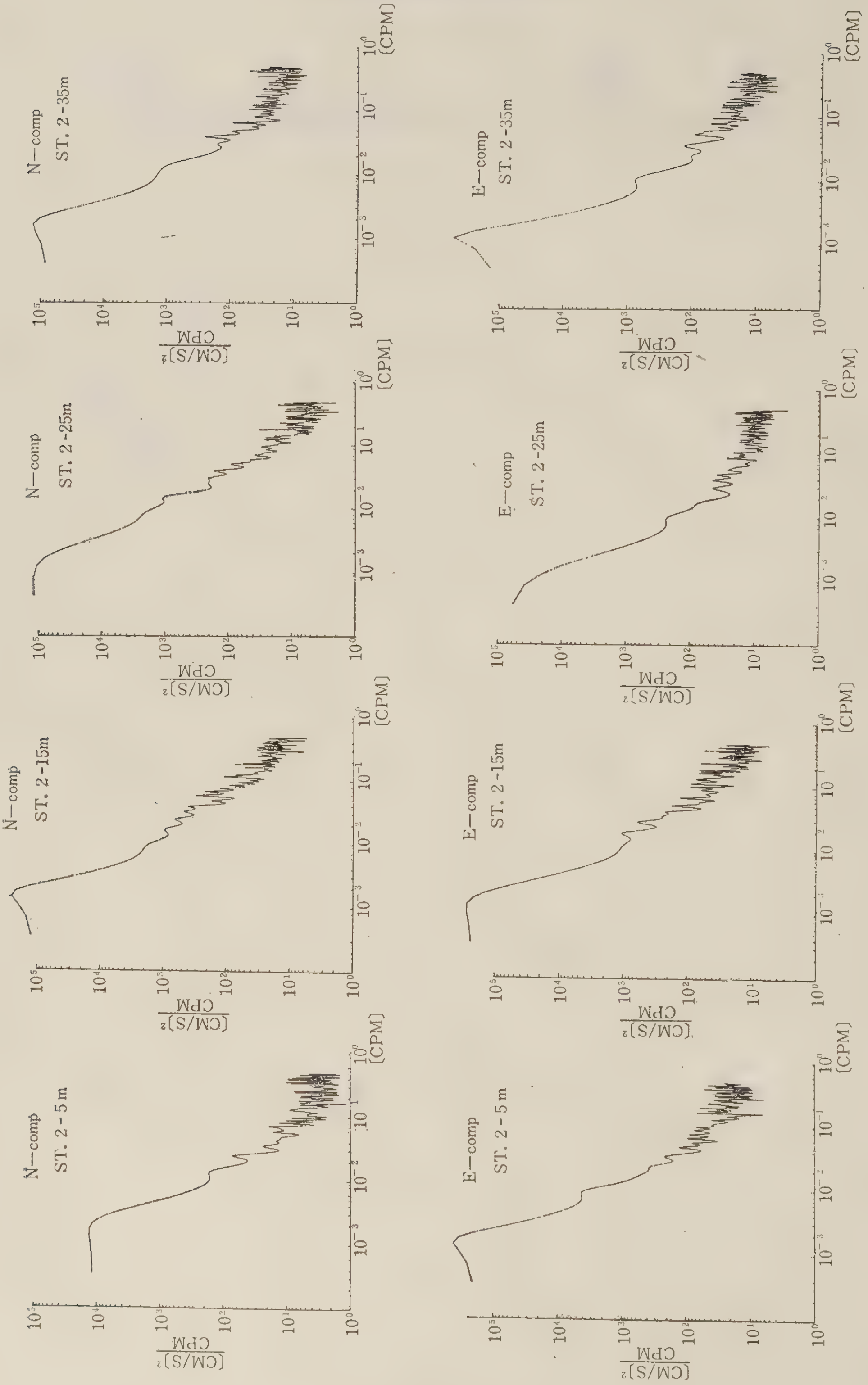


図 13 パワースペクトル（つづき）
Power spectrums

参考文献

1) アジア航測kk：鳴門海峡潮流潮汐調査報告書，1980,12

2) 速水頌一郎，宇野木早苗：瀬戸内海における海水交流と物質の拡散，第17回海工論集，1970,11

3) 中村充，萩野静也，海藤斎：水質改善のための潮流制御に関する研究(2)，第22回海工論集，1975,11

4) 大西外明，田中総太郎，西村司：海峡水域の大スケール渦生成・挙動に及ぼす海底地形の影響について，第27回海工論集，1980,11，その他

5) 中村充，上北征男，木村晴保，藤井泰司，大竹臣哉：礁による流動環境に関する研究，第27海工論集，1980,11

On the Jet Flow Characteristics of Naruto Strait

By

Makoto Nakamura and Toshifumi Noma

Summary

Jet flow in laboratory are abundantly studied, but study on large scale jet flow such as in strait is seldom. The authors happened to investigate Naruto Strait, and found some characteristics of flow.

Naruto Strait is famous of its vortices (Naruto no Uzushio) caused by time lag of tidal waves of inner basin Harima-Nada, and outer sea, Kii-Suido. (See Fig. 2)

Flow velocity in a strait can, in principle, be estimated by solving the N-S equation. At Naruto St., order-estimating the N-S equation, it is verified that the flow velocity can be estimated like as an orifice. (See Fig. 4)

$$u=\sqrt{2g\Delta h} \quad\cdots\cdots(2)$$

From the tides analysis, the duration of S-flow (flow from inner basin to outer sea) is larger than N-flow, and the water level difference in S-flow is also larger. This results that advective exchange flow is estimated 8.5×10^{10} m^3/year, that is comparable to the exchange flow of Akashi Strait. (Cross sectional area of Akashi St. is 6 times of that of Naruto St.)

The flow patterns in N-flow are shown in Figs. 7～9. There can be seen, rather many up-welling cells, vortices can be seen between up-welling cells. Up-welling velocity is estimated about 1.5～2.0 m/s by breaking of waves on the fringe of the cells. Also order of its velocity is considered by pressure change by velocity change in the fringe of jet flow.

水工研報告　3
1982　pp. 13～24

後流中の物質分散に関する研究

――濃度を指標としてみた後流域の特性と交換率の評価――

杜多　哲*

目　　次

1．緒　言……………………………………………13
2．実験装置および方法………………………………13
　2．1　実験装置………………………………………13
　2．2　実験方法………………………………………14
3．実験結果および考察………………………………15
　3．1　実験水路の特性………………………………15
　3．2　構造物背後の流速……………………………16
　3．3　構造物背後の濃度変化………………………16
　3．4　構造物背後の領域の分類……………………17
4．主流域と後流域との濃度交換……………………18
　4．1　交換モデル……………………………………18
8
　4．2　矩形的に染料を投入した場合…………………1
　4．3　三角形状に染料を投入した場合………………18
5．交換率の推定…………………………………………19
　5．1　相互相関関数を用いた場合……………………19
　5．2　なまのデータを用いた場合……………………20
　5．3　領域を変えた場合………………………………20
6．結　言…………………………………………………20
　〔付録〕………………………………………………22
　　参考文献……………………………………………23
　　Summary ……………………………………………24

1．緒　　言

流れの場に物体が置かれた場合，物体の背後に，物体表面の境界層のはく離の影響を受ける領域(後流域)が生じることはよく知られ，数多くの研究がなされている。しかし，それらは自由流線のはく離，物体背後の平均流速分布，乱れの分布，運動量の収支等，力学的側面に重点を置いたものが多い。

一方水産の立場からは，そういった力学的知見とともに，後流が物質の集積，分散に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。例えば，現在進行中の大規模増殖場事業の中では，沿岸域において，構造物の設置，投石などを行うことによって，浮遊卵稚仔，流れ藻等が，他海域へ流出するのを防止しようという試みがなされているが，どういった形状のものを，どの程度設置すれば，対象とする物質をどれだけ集積することができるかということについては，予測することができない。これを明らかにするには，一方で浮遊幼生，流れ藻等に固有の挙動を知るとともに，後流域が物質の移流，拡散に及ぼす影響についての知見が必要となる。

本研究では，こういった観点から，後流域が物質の分散に及ぼす影響を明らかにするための基礎的研究として，水粒子とほぼ同じ挙動をすると考えられる染料（メチレンブルー）を指標として，濃度の輸送という立場からみた後流域の特性を明らかにすること，また主流域と後流域との濃度の交換を定量的に把握するための手法を確立することを目的として行なった。

実験は当時東海大学学生であった今村　均氏と共同で行なった。また木村晴保博士（当時漁場施設研究室，現在高知大学）には，研究を進める上で種々の御助言を載いた。ここに謝意を表する。

2．実験装置および方法

2.1　実験装置

2.1.1　水槽の概要

本実験は農林水産省水産工学研究所（茨城県波崎町）において，幅1.5m，長さ65m，高さ1.25mの緩流速水槽で行なった。本水槽は貯水槽，高水槽，試験部水路からなっており，流量調節用のバルブ部に電磁流量計が取り付けてある。

試験部水路の水深は水路末端に設けられた堰板で調節でき，本実験においては水路中央での水深を80㎝に保って行なった。又，高水槽から試験部水路への噴き出しの影響による大きな渦を消すために上流部に多孔板2面，かごに詰めたサンフレックス2面，メッシュの細かい金

---

*　水産土木工学部

網1面を設置した。

2.1.2　構造物模型

構造物背後の流況を実験する場合，設置する構造物の形状は種々考えられるが，ここでは最も単純な直方体を用いた。水路中央部に高さ30cm，幅10cmのコンクリートブロックを並べ長さ146cmとして，流れに垂直に設置した。ブロックの表面は白色ペイントで塗装した。

2.1.3　染料投入装置

染料としてメチレンブルー4gと，水道水50ℓをポリタンク内で良く混合し，80ppmの染料液を作り，水中ポンプで染料投入装置に送り，流れの場に染料液を放出した。

染料投入装置は構造物の上流270cm（X/H＝−9）の位置に幅50cm，長さ140cm，高さ90cm，メッシュ2cmの金網かごに固定して，流れに垂直に設置した。染料投入装置の穴は，主流部の水とよく混合するように流れ方向と反対に向け，染料の放出が流れと反対方向になるようにした。

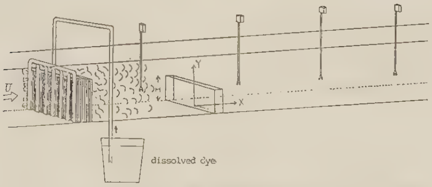


図 1　濃度測定模式図
Schematic view of experiment

表 1　主な付号の意味
Symbols used in the discussion

D	：水深（今回は全て80cm）
H	：構造物の高さ（今回は全て30cm）
X	：構造物からの流れ方向距離（cm）
Y	：底面からの高さ（cm）
Z	：水槽中央部からの幅方向距離（cm）
U	：X方向の主流流速（cm/sec）
$\bar{u}$	：X方向の局所平均流速（cm/sec）
$(\bar{u}'^2)^{1/2}$	：X方向の局所乱れの強さ（cm/sec）
t	：時間（sec）
C	：濃度（ppm）
τ	：隔り時間（sec）
$C_{ij}(t)$	：自己・相互相関関数
i	：$X/H=-4$の位置
j	：各測点の位置
V	：単位幅当りの体積（cm^3）
Q	：交換量（cm^3/sec）
α	：交換率（sec^{-1}）
b	：染料投入時間（sec）
C_m	：領域Ⅰでの染料投入時の濃度（投入時の濃度で無次元化したもの）

染料液の放出時間は，ポリタンク内の染料液が無くなるまでとしたが，ほぼ一定で約60秒であった。

濃度測定の模式図を図1に示す。また本報告で用いた主な記号の意味を表1に示す。

2.2　実験方法

実験に際しては実験部水路に導入するバルブの弁開度を一定（81%）とし，指示流量計（電磁流量計）が225l/secとなる様に微調節を行なった。

2.2.1　実験水路の特性

水路の特性を知るために構造物，染料投入装置の無い状態で試験部水路の中央の断面に，水平方向，鉛直方向の2本の測線を考え流速分布を測定した。これらの1点での測定時間は45secとした。

次に，流速の時間変動を測定するために断面の中心点（$Y=40$cm，$Z=0$cm）に流速計を設置し，1500sec間の測定を行なった。

なお，これらの流速変動の測定には超小型可逆プロペラ式流速計（直径5mm，8枚羽）を1本用いた。この流速計はパルス数のカウント時間0.5sec，測定間隔1.0secで，可逆流速計用カウンターを通してデジタルプリンターに記録し，0.5secごとのパルス数を電算機で流速値に換算して後のデータ処理を行なった。従って，得られたデータの測定間隔は1.5secとなっている。

この流速計は別の水路での曳航式台車による検定の結果，4cm/sec程度まではよく追従することが確かめられた。

流速計の測点位置固定及び移動は観測台車（X, Z軸方向に移動）に自動昇降装置（Y軸方向に移動）を取り付け，これに流速計を固定し，観測台車あるいは自動昇降装置を動かして行なった。

2.2.2　構造物背後の流速

構造物を設置した場合の流れの場を調べるために，図

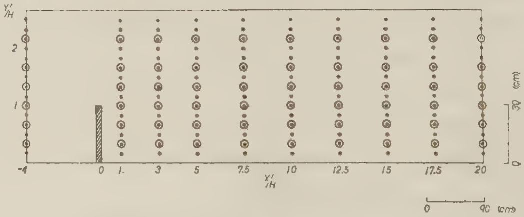


図 2　測　定　点
・流速の測点
○濃度の測点
Investigating point

2 に示す様な測点（Y= 5 ～75cm，$X/H=-4\sim20$）での流速を測定した。

流速の測定は実験水路の特性と同様に 1 本の流速計を移動して行なった。

なお，ここでは 1 点ごとの測定時間は 60sec とした。

2.2.3　構造物背後の濃度変化

構造物を設置した状態で図 2 に示す様な測定点（$Y=$15～70cm，$X/H=-4\sim20$）での濃度を測定した。

測定は，6 本の濁度計を用いた。そのうちの 1 本は構造物前面（$X/H=-4$）に設置し，残りを構造物背後の各測点に設置して，放出された染料の時間的な濃度変化を測定した。

用いた濁度計はKENEK社 PM-206型で検出面の直径2mm，測定間隔10mmのものである。この濁度計の原理は透過光が濁水を通過する際に懸濁物の濃度によって指数関数的に減少することを利用するもので，光を発生し，フォトダイオードで受光して，電気量に連続的に変換を行なう。本実験では連続的に検出された電圧をマルチコーダーにアナログで記録し，これをカーブリーダーで0.5secおきにデジタル化し，電算機で濃度値（ppm）に変換して後のデータ処理を行なった。

各濁度計は実験の前後で検定を行なった。

濁度計の測定位置での固定及び移動は，流速計と同様にした。各測点での観測時間は染料放出直前から，染料が測定区域からほぼ流出し，電圧が安定するまでとした。

3.　実験結果及び考察

3. 1　実験水路の特性

鉛直方向（XY軸面，$Z=0$ cm）の局所平均流速 $\bar{u}$ と，その乱れの強さ $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の分布を測定した結果を図 3 に示す。又幅方向（ZX軸面，$Y=40$cm）の局所平均流速 $\bar{u}$ と，その乱れの強さ $(\overline{u'^2})^{1/2}$ の分布を図 4 に示す。

これらから底面での境界層の厚さは10cm程度で，自由水表面付近では速くなっている。又，側壁での境界層の厚さは同じく10cm程度であり，水路幅中央（$Z=0$ cm）では流速が遅くなっているが，主流部流速との差は 1 cm/sec 程度と小さい。従って水路における流れは境界層の影響を受ける両端10cm程度を除いて，ほぼ一様であると考えることができる。乱れの強さについては鉛直，幅両方向において $(\bar{u}'^2)^{1/2}=0.4\sim0.8$cm/sec の範囲で，ほぼ一様に分布している。

次に，$Z=0$ cm，$Y=40$cmの測点で連続流速測定（約1500sec）を行なった結果を図 5 に示す。図中の $\bar{u}$ は67.5 sec 間の移動平均結果を示している。移動平均流速を考えると，同一測点においても平均流速にして $\bar{u}=16.5\sim18.0$cm/sec の変動が見られる。又，同図中には移動平均に対応して，その乱れの強さ $(u'^2)^{1/2}$ の時間変動を示

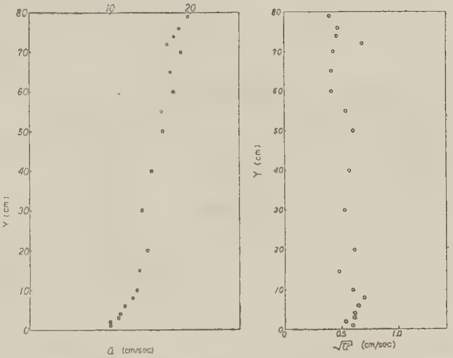


図 3　鉛直方向平均流速分布と乱れ分布（Z= 0 cm）
Profile of $\bar{u}$ and $\sqrt{\overline{u'^2}}$

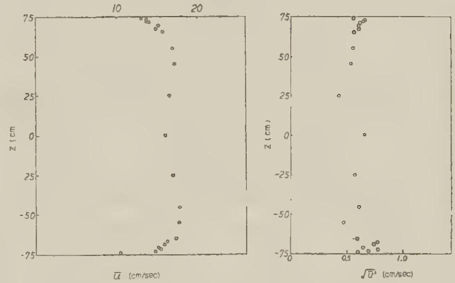


図 4　幅方向平均流速分布と乱れ分布（$Y=40$cm）
Cross section of $\bar{u}$ and $\sqrt{\overline{u'^2}}$

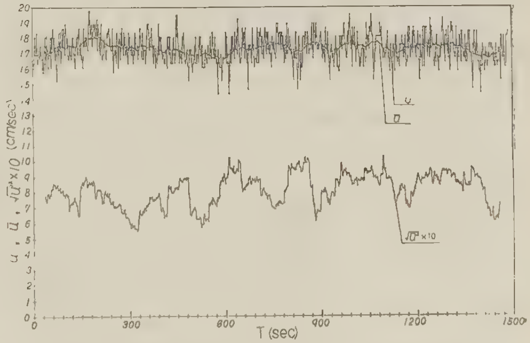


図 5　流速の時間変動（流速u，67.5秒移動平均$\bar{u}$，$\bar{u}$ に対する乱れ $\sqrt{\overline{u'^2}}$）

Time series record of u, $\bar{u}$, $\sqrt{\overline{u'^2}}$

した。乱れの強さは，0.6〜1.0cm/sec 程度の幅で変動している。

3. 2　構造物背後の流速分布

各測点での平均流速ならびに，この時の乱れの強さの鉛直分布を図示したのが図6，図7である。

従来，後流（wake）の議論ではその影響の及ぶ領域の特性値として，平均流速が負になる領域等をとり，考察する側が多い1),2)。それらとの比較を行ない，又構造物背後の領域をパターン分けするために，平均流速と乱れの強さの等分布線を求めると図8，図9となる。これらの図と図6，図7から，構造物背後において，構造物に近く自由水表面に近いところで極めて流速が速くなっていることがわかる。又，この表層部と構造物より低く流速の遅い区域との間には速度勾配の極めて大きい領域があり，それらは $(\bar{u}'^2)^{1/2}$ の極大となる領域とほぼ対応している。

更に，図8において，平均流速 0 cm/sec の領域が $X/H=5$ となっているが，光安・平城らによる実験では $X/H=17$ という結果が得られている。

今回の実験でX/H＝5 と極めて小さかった原因としては，水深に対しての構造物の高さの割合が8：3と大きいために（光安・平城らの場合は自由水面をもたず水深が有限の場合とは異なる）自由水表面の影響が強く表われたと考えられる。

次に平均流速 $\bar{u}$ で無次元化した乱れ $(\overline{u'^2})^{1/2}/|\bar{u}|$ の等分布線を求めると，図10となる。但し図中の数字は百分率で表示してある。この図から構造物背後から $X/H=7.5$〜10 の領域内で乱れが極めて強く，構造物に近くて自由水表面付近では，極めて乱れが弱くなっていることがわかる。このことは一般にいわれる流体が加速された場合には乱れが相対的に減少することと対応している。

3. 3　構造物背後の濃度変化

濁度計による測定結果のうち，代表的な測点でのものをいくつか選んで図11に示す。

図が頻雑となるため同図は示していないが，構造物前（$X/H=-4$）では，濃度は矩形的に変化しており，その継続時間はおよそ60secであった。又，図13より構造物に近く水深が大きい程最大濃度が小さく，濃度がゆっくりと増加し，又，ゆっくりと減少していくことがわかる。

各測点での濃度の時間的変化と構造物前面での濃度との関係をみるために構造物前を基準として，測定点での濃度変化の自己，相互相関関数3)（auto, cross-correlation function）を求めた一例が図12であり，各位置での相関関数の最大値（$C_{ij}(\tau)$）と，その時の隔り時間（τ）を表わしたものが図13，図14である。

この2つの図から，構造物の背後において構造物に近く水深が大きい程構造物前との相関が小さく，隔り時間が大きい。一方，構造物に近く自由水表面に近い程相関が大きく，隔り時間が小さいことがわかる。

これは流速測定結果とよく対応している。即ち，相関が高く隔り時間の小さい領域は流速が大きく，乱れの小さい領域と対応しており，現象的には構造物前面で投入された染料があまり乱されずにこの領域に運ばれていることを示している。逆に，相関が低く隔り時間が大きい領域は，平均流速が小さく，乱れが相対的に大きい領域

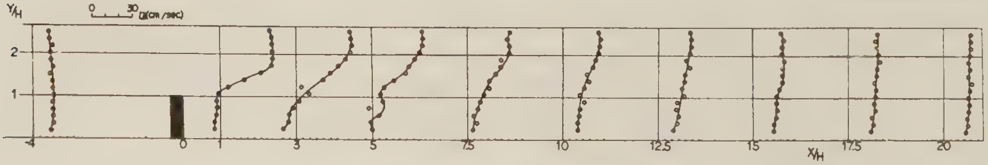


図 6　構造物後方の平均流速分布

Distribution of $\bar{u}$ behind the model

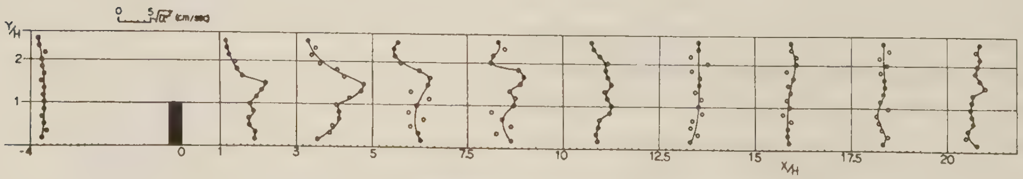


図 7　構造物後方の乱れ強さの分布

Distribution of $\sqrt{\overline{u'^2}}$ behind the model

とほぼ一致しており，移流より拡散によって濃度が運び込まれて来ることが推定される。

3. 4　構造物背後の領域の分類

流速，乱れ（図 6 ～10），相関関数の最大値，その隔り時間（図13～14）等の等分布線図より，構造物背後を図15に示す様に大きく 3 領域に分けることができる。

領域 I

構造物上端から $X/H=12.5$ を結ぶ上に閉じた領域。この領域は構造物による縮流の影響を受け，平均流速が速く乱れの小さい主流部と考えられる。濃度の測定結果からは構造物前との相関が高く，相互相関関数の形も構造物前に対応した三角形状になっている。（矩形同志の相互相関関数は三角形となる：付録参照）従って，投入された染料はあまり拡散の影響を受けることなく移流によって通過して行く領域と考えることができる。

領域 III

構造物上端から $X/H=7.5$～10の間を結ぶ下に閉じた領域。この領域内では構造物によって生じる後流的性格が強い。即ち，平均流速が小さく．相対的に乱れ $(\overline{u'^2})^{1/2}/|\bar{u}|$ が大きい。濃度の測定結果から，この領域内では構造物

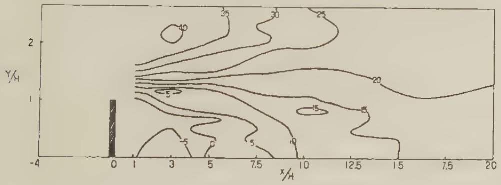


図 8　平均流速の等分布線（単位 cm/sec）

Contours of $\bar{u}$

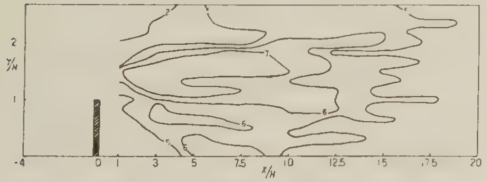


図 9　乱れ強さの等分布線（単位 cm/sec）

Contours of $\sqrt{\overline{u'^2}}$

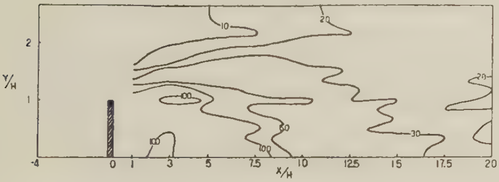


図 10 $\sqrt{\overline{u'^2}}/|\bar{u}|$ の等分布線（単位 %）

Contours of $\sqrt{\overline{u'^2}}/|\bar{u}|$

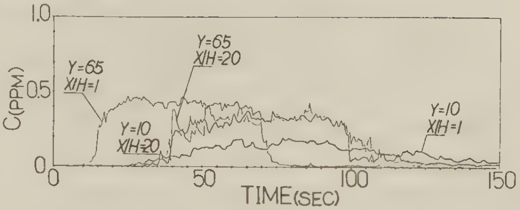


図 11　濃度測定結果の一例

An example of concentration measurement

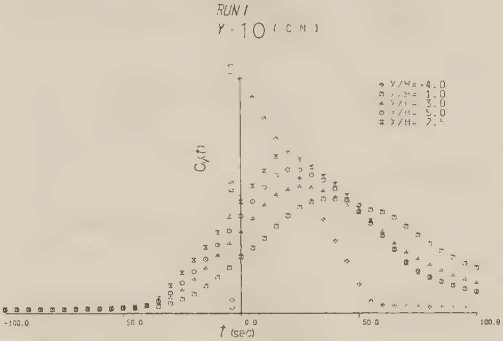


図 12　相互相関関数の一例

An example of calculated cross correlation function

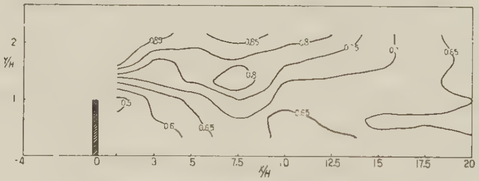


図 13　相互相関関数の最大値の等分布線

Contours of maximum value of Cii (τ)

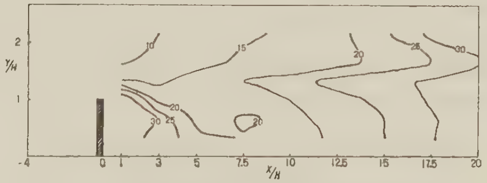


図 14　隔り時間の等分布線（単位 sec）

Contour of lagtime

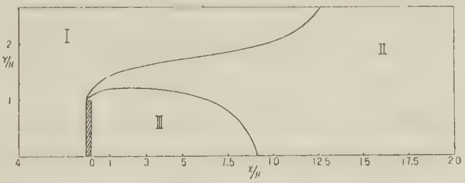


図 15　領域の分類

Classification of region

前との相関が低く，隔り時間が外の領域に比べて大きい。相互相関関数の形は，構造物前の形状と異なりなだらかになっており，領域内での物質の移動には拡散が大きい比重を占めていると考えられる。

領域Ⅱ

領域Ⅰと領域Ⅲの中間的な領域である。この領域は乱れの絶対値の極大となる点を囲んでおり，この領域内を構造物からの剥離によって生じた渦が通過して行くものと考えられる。従って，物質輸送の立場からは領域Ⅰ～Ⅲの間の交換を行なう領域と考えることができる。

4.　主流域と後流域の濃度交換

4.1　交換モデル

これまで述べて来た実験結果から，構造物背後の流れの場，又，そこでの濃度輸送の機構についてある程度明らかになった。一方実用上の立場からは構造物背後での微細な機構よりも，構造物を設置したことによる物質輸送過程の変化を全体として知ることが必要である。本章ではこの立場から，物質の交換に関するマクロ的なモデルを組み立てた。

現象は2次元で表わされると仮定し，z 方向の単位幅当りについて考える。水塊は図15に示す様に大まかに3つの領域に分類でき，それぞれ領域Ⅰ，Ⅱ，Ⅲとする。Ⅱの領域は領域ⅠとⅢの物質の交換を行なう領域と考えられ，近似的には領域Ⅱを無視することができる。

領域ⅠからⅢの間には単位時間当り$Q_{\mathrm{I\,III}}$の水の交換（量）があり，それに従って濃度が輸送される。ここで各領域の容積，濃度をV_{I}，V_{II}，V_{III}，C_{I}，C_{II}，C_{III}とする。

この場合，領域Ⅲの濃度を支配する方程式は以下の様に表わせる。（但し濃度の変化に伴なう密度の変化を無視するものとする。）

$$\begin{cases} \dfrac{d(C_{\mathrm{III}}V_{\mathrm{III}})}{dt} = -(C_{\mathrm{III}}-C_{\mathrm{I}})Q_{\mathrm{I\,III}} & \cdots\cdots(1) \\ C_{\mathrm{I}} = C_{\mathrm{I}}(t) & \cdots\cdots(2) \end{cases}$$

ここでⅠの領域は本来Ⅲの領域の影響を受けるが，Ⅰの領域がⅢの領域と比べて大きいこと，又実験結果よりこの領域は構造物前面と殆んど同じ濃度の時間変化を示したことから，この領域の濃度はⅢ領域とは独立に決まるものと考えた。

⑴式の両辺をV_{III}で割って

$$\frac{dC_{\mathrm{III}}}{dt} = -\frac{Q_{\mathrm{I\,III}}}{V_{\mathrm{III}}}C_{\mathrm{III}} + \frac{Q_{\mathrm{I\,III}}}{V_{\mathrm{III}}}C_{\mathrm{I}}$$

ここで

$$\frac{Q_{\mathrm{I\,III}}}{V_{\mathrm{III}}} = \alpha$$

とおき⑵式を考慮すると

$$\frac{dC_{\mathrm{III}}}{dt} + \alpha C_{\mathrm{III}} = \alpha C_{\mathrm{I}}(t) \quad \cdots\cdots(3)$$

α は単位時間当り，領域Ⅲの容積に対してどれだけの水が交換されたかを示しており，交換率と定義する。

これは線形1階微分方程式であるから，Ⅲについて解くと

$$C_{\mathrm{III}} = \left[\int \alpha C_{\mathrm{I}}(t)e^{\int\alpha dt}dt + C_0\right]e^{-\int\alpha dt}$$

$$= \left[\int \alpha C_{\mathrm{I}}(t)e^{\alpha t}\,dt + C_0\right]e^{-\int\alpha dt} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここでC_0は積分定数である。

従って染料の投入条件によって，$C_{\mathrm{I}}(t)$が決まり，交換率 α が決定すれば，⑷式に$C_{\mathrm{I}}(t)$，α を代入して積分することにより，$C_{\mathrm{III}}(t)$を決定することができる。

4.2　矩形的に染料を投入した場合

領域Ⅰにおいて濃度の変化が図16に示すように $0\leqq t\leqq b$ の間に矩形パルス的に変化する場合を考えると

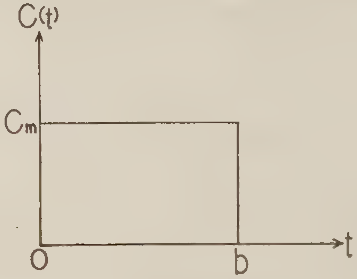


図 16　矩形的な染料投入

Rectangurar initial condition

$$C_{\mathrm{I}}(t) = \begin{cases} C_m\ (0\leqq t\leqq b) \\ 0\ (b\leqq t) \end{cases} \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。

この場合の解は

$$C_{\mathrm{III}}(t) = \begin{cases} C_m(1-e^{-\alpha t}) & (0\leqq t\leqq b) \\ C_m(1-e^{-\alpha b})e^{-\alpha(t-b)} & (b\leqq t) \end{cases} \quad \cdots\cdots(6)$$

4.3　三角形状に染料を投入した場合

領域Ⅰにおいて濃度$C_{\mathrm{I}}(t)$が$0\leqq t\leqq 2b$の間に，三角形状に変化する場合を考えると（図17）

$$C_{\mathrm{I}}(t) = \begin{cases} C_m\left(1-\left|\dfrac{t}{b}-1\right|\right) & (|t-b|\leqq b) \\ 0 & (b\leqq|t-b|) \end{cases} \quad \cdots(7)$$

となる。

この場合の解は

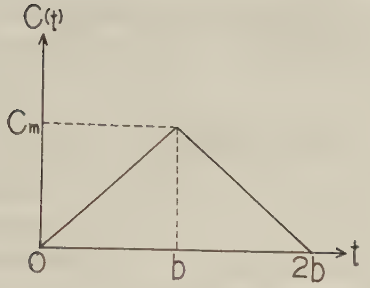


図 17　三角形状の染料投入
Triangular initial condition

$$
C_{\mathrm{III}}(t)=\begin{cases} C_m\dfrac{t}{b}-\dfrac{C_m}{\alpha b}(1-e^{-\alpha t}) & (0\leqq t\leqq b)\\[2mm] C_m\left[2-\dfrac{t}{b}+\dfrac{1}{\alpha b}+\dfrac{1}{\alpha b}(1-2e^{-\alpha b})e^{-\alpha t}\right] & (b\leqq t\leqq 2b)\\[2mm] \dfrac{C_m}{\alpha b}(1-e^{-\alpha b})^2e^{-\alpha(t-2b)} & (2b\leqq t)\end{cases}\quad\cdots\cdots(8)
$$

5.　交換率の推定

次に上で述べたモデルを実験結果にあてはめ，現象がこのモデルでどの程度表わされるか，また交換率としてどういった値が得られるかについて検討した。

実験での染料投入は時間に対してほぼ矩形的になされており，また実験結果よりⅠの領域でも，ほぼ矩形的であることから$C_{\mathrm{I}}(t)$として矩形モデルを用いることができる。しかし濁度計の数（6本）の制約から，全点を同時測定することができなかったため，各測線での測定結果を基準化し，同一の投入条件下での測定結果とみなせる様にする必要がある。その基準化の一方法として，投入点の濃度と測定点の濃度の時間変化の相互相関関数を用いることが考えられる。付録に示す様に矩形と任意関数の相互相関関数は，任意関数を矩形幅で移動平均することと等しく，又本研究で用いた相互相関関数は，投入点での自己相関関数の最大値で基準化されていることから，相互相関関数は投入点において，単位濃度(1)が時間bの間投入された場合の濃度を投入時間bで移動平均した測定結果とみなすことができる。この方法は基準化に主観が入らないこと，又投入開始時間，投入濃度が自動的に基準化されることなどの利点があり，本章ではまず相互相関関数を用いてモデルへのあてはめを行なった。次いで，基のデータを用いて相関関数を用いて得られた結果の検証を行なった。

5. 1　相互相関関数を用いた場合

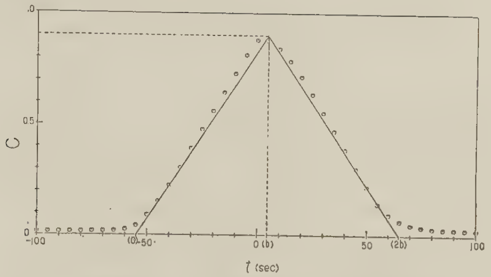


図 18　領域Ⅲにおける濃度変化（移動平均結果）
○印：実測値
Change of C in region Ⅰ

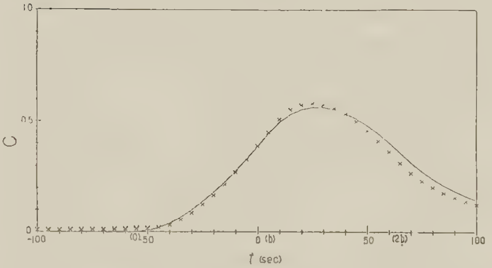


図 19　領域Ⅲにおける濃度変化（移動平均結果）
○印：実測値
実線計算値 $\alpha=0.026$
Change of C in region Ⅲ

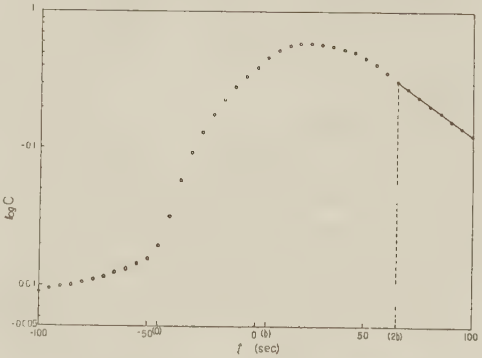


図 20　対数目盛にプロットした領域Ⅲの濃度変化（移動平均結果）
○印：実測値
実線：直線のあてはめ
Relation between t and $\log C$ in regionⅢ

先に述べた様に，相互相関関数は投入時間bという時間スケールで平均化された濃度変化と見ることができる。ここではこれを単に濃度変化と呼ぶ。

領域Ⅰにおいての濃度変化を求めると，図18となる。これは領域Ⅰ内での測点における濃度の時間変化を空間的に平均したものである。この領域内での濃度変化はほぼ三角形状をしており，付録に示すように平均化しない濃度の時間変化が矩形的であったことを示している。こ

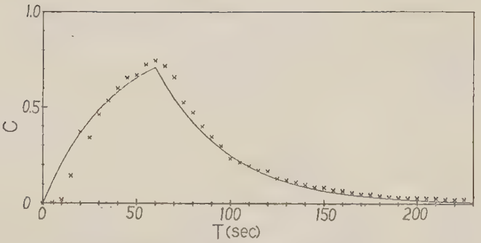


図 21　領域Ⅲにおける濃度変化（なまのデータ）
×印：実測値，実線：計算値
Change of C in region Ⅲ (raw data)

れより b＝60sec, $C_m=0.9$ が得られた。同様に領域Ⅲ，においての濃度変化を求めると，図19（×印）となった。ここで⑻式より $2b\leqq t$ のとき

$$C_{\text{Ⅲ}}=\frac{C_m}{\alpha b}(1-e^{-\alpha b})^2e^{-\alpha(t-2b)}$$

であるから，両辺の常用対数をとると

$$\log C_{\text{Ⅲ}}(t)=\log\frac{C_m}{\alpha b}(1-e^{-\alpha b})^2-\alpha(\log e)\cdot(t-2b)$$

となり，このモデルでは横軸に t，縦軸に $\log C_{\text{Ⅲ}}(t)$ をとると，$t\geqq 2b$ の領域では傾き $\alpha\ \log\ e$ の直線にのることがわかる。図20に領域Ⅲでの濃度の測定値と，それにあてはめた直線を示す。

これより最小2乗法で $\alpha\ \log\ e$ を求めると

$$\alpha\ \log\ e=1.31\times10^{\ 2}$$

$$\therefore\alpha=0.026$$

が得られる。

次に，⑻式に得られた α，C_m，b を代入すると図19に示す実線となった。

この図より，$t\leqq 2b$ の範囲での傾きから得られた α と，領域Ⅰでの最大濃度 C_m，投入時間 b から，$0\leqq t\leqq 2b$ の領域での濃度の時間変化がよく説明されている。このことは，このモデルがある程度現象を表現していることを示すと考えられる。

5.2　なまのデータを用いた場合

相互相関関数を濃度測定値の移動平均とみなした場合に，モデルは現象をよく説明していた。α は時間とは無関係な場に固有の量であると考えられるので，前節で得られた α を用いて，基のデータが説明できるか否か調べた。

そこでⅢ内の各測点の濃度変化を，構造物前での濃度変化の投入時間 60sec の濃度の平均値で基準化し，各測点の時間変化を空間的に平均したのが図21中の×印である。一方，⑺式に前節で得られた C_m，b，αを代入すると，同図中の実線となった。

この図より，領域内での濃度変化はよく表わされており，相互相関関数を用いて求めた α が妥当であると考えられる。

5.3　領域を変えた場合

前で領域ⅠとⅢの交換率 α を求め，それが現象をよく説明していることを述べた。この交換率は領域のとり方によって変わると考えられる。ここでは図22に示す様に，領域ⅢのとりかたをⅢ A～E まで変え，その場合の α の変化と，実測値のモデルからのずれについて調べた。この場合，用いた方法は5.1で述べたものである。この結果を図22，表2に示した。表には各領域内の単位幅当りの体積 V，境界線長 ℓ，交換量 Q を示した。体積は，図24において領域の境界線をカーブリーダーで読み取り，シンプソンの公式を用いて，領域内の面積を求めた。これより単位幅当りの体積が求められた。又，領域ⅠからⅢでの交換量は $Q=\alpha V$ より推定した。

これらの結果から以下のことがわかる。

○これらの領域分けのうち，極端に小さな領域Ⅲ A などでは対応が悪くなっている。

○領域を大きくとるに従って α が増大し，それは濃度の時間変化では，ピーク値の増大，曲線の立ち上がり，減衰の勾配が急になることと対応している。

○この濃度変化は，投入点での濃度変化との相互相関関数であることを考えると，領域を大きくとるにつれ移流の影響が強くなり，交換率 α が高くなることを示している。領域をより大きくとった場合には α がより増大すると共に，モデルとのずれが大きくなると考えられるが，本実験の範囲では確認できなかった。

これらのことから，このモデルを用いる場合には，対象とする領域を明確にしておく必要がある。又，交換率 α は流速場，乱れの場と密度に関係すると考えられるので，今後これらとの関係を明らかにして行くことが必要である。

6.　結　　言

流れの場に構造物を設置した場合に生ずる後流が，物質のとり込み，拡散に及ぼす影響を濃度を指標として調べることにより，以下のことが明らかになった。

1)　本実験では他の実験と比べると平均流速が負となる領域が小さいが，これは構造物と水深の比が 3：8 と大きく構造物上部での縮流が激しかったことと関連すると思われる。

2)　平均流速，乱れの分布と構造物背後の各点での濃度の時間変化はよく対応しており，これらから構造

物背後を大きく以下の3つの領域に分けることができた。

領域Ⅰ

平均流速が速く，乱れの小さい主流部であり，構造物前面で投入された染料が移流によって通過して行く領域。

領域Ⅲ

後流的性格が強く，平均流速が小さく相対的に乱れが大きく，構造物前面で投入された染料は主として拡散によってこの領域に運び込まれ，流出して行く領域。

領域Ⅱ

領域ⅠとⅢの中間的な領域であり，構造物からの剝離渦が通過して行く領域と考えられ，物質輸送の立場からは領域ⅠとⅢの物質交換を行なう領域。

3) 実験結果から分けられた3つの領域において，Ⅰ領域とⅢ領域がⅡ領域の作用によって物質の交換を行なうとしてモデルを考え，このモデルを実験結果

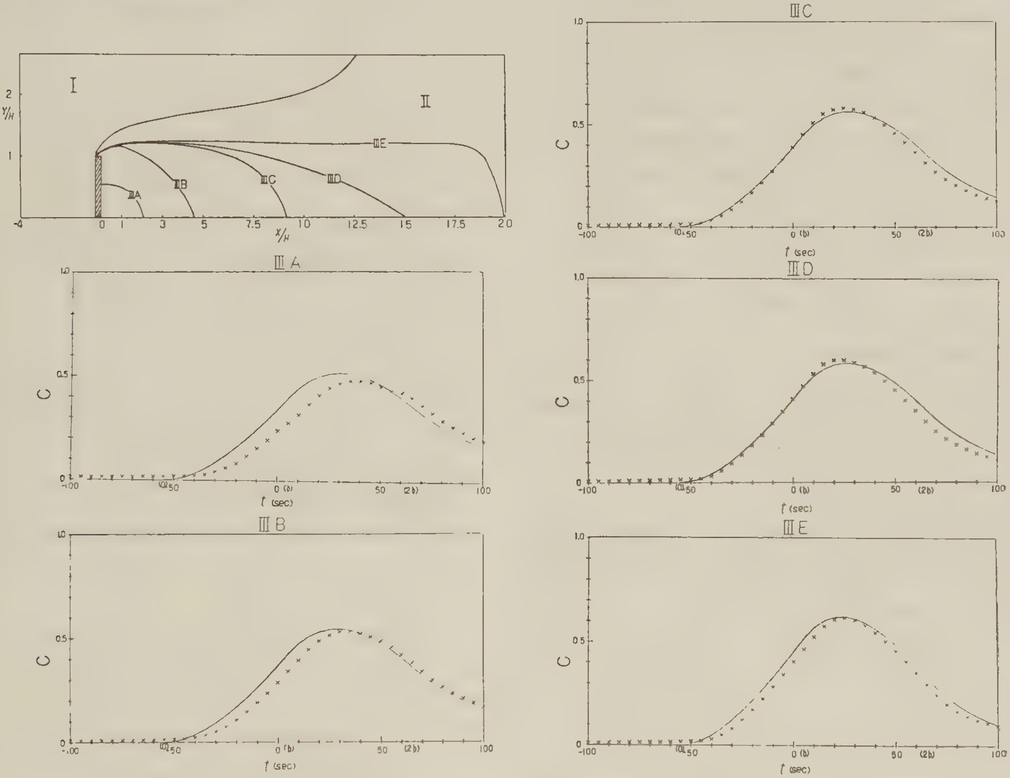


図 22 領域を変化させた場合の比較
×印：実測値，実線：計算値
Comparison of calculated and measured change of C in region Ⅲ, when the boundary of region Ⅱ and Ⅲ is changed.

表 2 領域を変化させた場合の比較
Comparison of α, when the boundary in changed

領 域		Ⅲ A	Ⅲ B	Ⅲ C	Ⅲ D	Ⅲ E
$\alpha=(Q/V)$	(sec^{-1})	0.022	0.024	0.026	0.028	0.028
境界線長：ℓ	(cm)	64	152	283	453	607
単位幅当りの体積：V	(cm^3)	734	3,573	8,004	11,512	20,083
交換量：Q	(cm^3/sec)	16.1	85.8	208.1	322.3	628.8
単位長さ当りの交換量：Q	(cm^2/sec)	0.25	0.56	0.74	0.71	1.12

にあてはめたところ，よく現象が説明された。

4)　領域Ⅲの大きさを変えたところ，領域を大きくとるに従って交換率αは増大した。このαが平均流速分布，乱れの分布とどう関係づけられるかは研究の必要がある。

以上これらの結果から，殆んど研究のなされていなかった物質移動の立場からみた後流中の特性，その評価法についてかなり明らかとなった。

本研究はあくまでも特定の条件下で行なわれたものであり，この結果をそのまま異なる条件下に応用することはできないが，ここで導入された手法を用いて実験的に，その条件下での交換特性を求めることができる。今後の課題としては各種条件下での交換特性を求めると共に，交換率と流れの場との関係について研究を進めることが必要である。また浮遊卵稚仔等を対象とする場合には，その比重，行動様式等を明らかにし，モデルに組み込んでいくことが望まれる。

〔付　録〕

相関関数と移動平均

本研究では構造物前面の濃度の時間的変化と，構造物背後の各点での濃度の時間的変化の相互相関を用いている。ここでは本研究で用いた相関関数の定義と，その結果の表わす意味について述べる。

構造物前面の濃度の時間変化を$x(t)$，背後の濃度の時間変化を$y(t)$とする。

まず次の様な関数$C'_{xy}(t)$を考える。

$$C'_{xy}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}(x(t)\cdot y(t+\tau))\,dt \cdots\cdots\cdots(1)$$

（ここにτは隔り時間を意味する）

この関数は，一般の相互相関関数の性質をもつが，本研究では構造物前面の濃度の時間変化がほぼ矩形状であることから$x(t)$が矩形である場合の意味について述べる。

1.　$x(t)$, $y(t)$が今付図1の様な時間変化をしている場合

$$x(t)=\begin{cases}K & (t_0\leqq t\leqq t_0+b)\\ 0 & (t<t_0,\ t_0+b<t)\end{cases}$$

従って(1)式は

$$\begin{aligned}C'_{xy}(\tau)&=\int_{t0}^{t0+b}K\cdot y(t+\tau)\,dt\\ &=K\cdot\int_{t0+\tau}^{t0+\tau+b}y(t)\,dt \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)\end{aligned}$$

これは図より明らかに，$t=t_0+\tau+\dfrac{b}{2}$を中心として$y(t)$を$\pm\dfrac{b}{2}$で積分することと対応している。

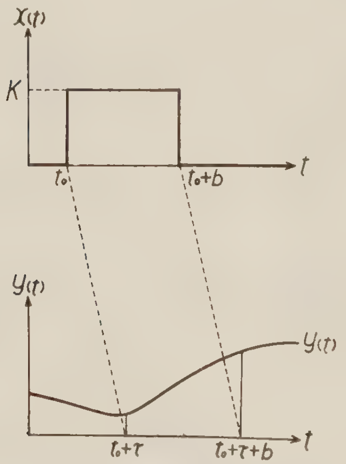
従って時間tの基準を$t=t_0+\dfrac{b}{2}$にとれば

$$\begin{aligned}C'_{xy}(\tau)&=K\int_{\tau-\frac{b}{2}}^{\tau+\frac{b}{2}}y(t)\,dt\\ &=K\cdot b\cdot\overline{y(\tau)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)\end{aligned}$$

従って$C_{xy}(t)$は，本質的には$y(t)$を幅bで移動平均したことと同等である。

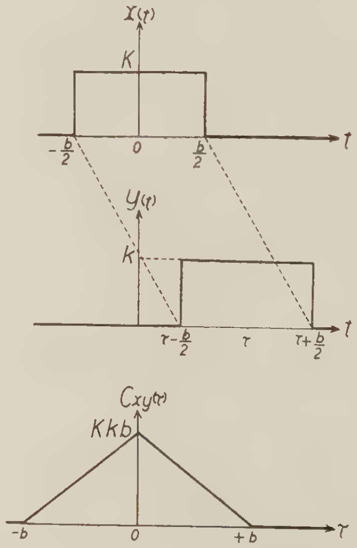
2.　$y(t)$も矩形の場合

$y(t)$も付図2の様な矩形の場合は1の特別な場合で



付図　1　矩形と任意関数との相互相関関数

Cross-correlation between $x(t)$ and $y(t)$, when $x(t)$ is rectangular.



付図　2　矩形と矩形の相互相関関数

Cross-correlation between $x(t)$ and $y(t)$, when both are rectangular.

あるから，相互相関関数は⑶式より直ちに

$$C'_{xy}(\tau)=K\cdot b\cdot\overline{y(\tau)}$$
$$=K\cdot k(b-|\tau|)\quad\cdots\cdots(4)$$

（$x(t)$の自己相関関数の場合は$k=K$であるから

$$C'_{xx}(\tau)=K^2(b-|\tau|)$$

となる4)）。

なお，本研究では以上の$C'_{xy}(\tau)$を$C'_{xx}(0)=K^2b$で無次元化し相関関数と呼んでいる。

以上を整理すると

⑴$x(t)$が矩形の場合

$$C_{xy}(\tau)=\frac{1}{K}\overline{y(\tau)}\quad\cdots\cdots(5)$$

⑵$x(t)$，$y(t)$が矩形の場合

$$C_{xy}(\tau)=\frac{k}{K}\left(1-\left|\frac{\tau}{b}\right|\right)=C_m\left(1-\left|\frac{\tau}{b}\right|\right)\quad\cdots\cdots(6)$$

本研究では領域Ⅰの濃度の時間変化がほぼ⑹式で表わされており，この領域での濃度変化が矩形的であったこと，またその濃度は投入点濃度のk/Kであったことがわかる。

参考文献

1) 光安信・平城直治：平板突起物後方の流出渦と乱れ分布について，九州大学応用力学研究所所報　第34号，昭和45年

2) 加藤始・木村久雄・寺川博也：突堤後方の流れに関する基礎実験――模型歪みの影響の検討――，第27回海岸工学講演会論文集，1980

3) 赤池弘次・中川東一郎：統計的解析と制御，サイエンス社

4) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店

On the Characteristics of Water Exchange in the Wake

By

Satoru TODA

Summary

In this paper the characteristics of the wake that is seen behind the wall under uniform flow is experimentally studied especially related to the dye concentration transport. The plane source of dissolved dye (methylene blue) is injected upstream the model and the change of the concentration is measured at about 60 points.

The results are as follows.

1) The change of the concentration of each point corresponds well with velocity field, and the area behind the model is classified into three regions.

region Ⅰ: region of potential flow, where the mean velocity is strong and $\sqrt{\overline{u'^2}}$ is small, the dye transport is mainly done due to convection.

region Ⅱ: intermediate region of Ⅰ and Ⅲ, where the vortex generated at the edge of the model passes.

region Ⅲ: region of wake, where the mean velocity is weak and $\sqrt{\overline{u'^2}}/|\overline{u}|$ is large, the dye transport is mainly done due to diffusion.

2) A simple model of the water exchange (eqs. (1)—(8)) can explain the change of the dye concentration of region Ⅲ (Figs. 19—21).

3) The water exchange rate between region I and Ⅲ increase according to the increase of the volume of region Ⅲ. So, it is important to clarify the region considered when this water exchange model is used.

The results mentioned above show that we can estimate the effect of the wake from the point of view of water quality transport by the method mentioned in this paper. As a next step, the investigation of the relationseip betwhen water exchange rate and the velocity field is expected.

水工研報告　3
1982　pp. 25～39

内部落下流に関する実験的研究

乃万俊文*・中村　充*

目　次

1. 緒　言……25
2. 水理現象および解析方針……25
3. 実験の方法……27
4. 実験結果とその考察……30
4.1 密度成層のない場合……30
4.2 密度成層のある場合……32
5. 結　論……34
参考文献……35
Summary……36
付　表……38

1. 緒　言

湾内水深に比べて水深の小さい交流口で外海と接続している閉鎖性内湾漁場では，夏季には陸水や太陽輻射の影響をうけて表層には比較的密度の小さい水があり，下層には密度の大きい水が停滞して密度成層を形成し，水質はよくない。このような漁場の水質環境改善方法の一つとして海水交換量の増大が考えられる（海水交換量とは潮汐により外海水が湾内に流入し，その一部が湾内固有水と置き代って流出時に湾内にとどまる量と定義される)。海水交換増大のためには湾口付近における海水交換の機構を知らねばならない。

上層密度ρ_1，下層密度ρ_2と密度成層を形成している湾へ流入する密度ρ_0 ($\rho_0>\rho_1$) の外海水は湾口端で内部落下をおこし，落下途中および密度境界面に衝突する際に湾内水を混入し，それ自体の流量および密度を変化させる。$\rho_0>\rho_2$ の場合条件によってはプルーム（流入水）は境界面付近を進行したり，底面に沿って進行したりする。これは内部落下に伴なう湾内水混入による密度変化の如何によって定まることである。一方下げ潮時には上層からの流出が大きいことを考えると，内部落下後のプルームがどの水深を，どんな層厚で進行するかは海水交換にとって重要な問題となる。

この研究は内部落下に伴なう湾内水の混入を量的に把握する目的で行った。内部落下流においては湾口上で不等流となり内部限界水深が存在しまた落下に伴なう内部跳水が存在し，内部跳水終了点以降はほぼ常流となる。ここでは内部限界水深発生位置と内部跳水終了点とを検査面にとってエネルギー則を適応し，内部落下に伴なう層厚変化または混入率について検討し，両検査面間でのエネルギーの熱としての損失率がわかるとそれらが計算できることを水槽実験によって確かめた。

本研究を行なうに当って水槽実験は当時東海大学海洋学部学生であった桜井敏幸，島川良英，東京水産大学学生であった熊谷健蔵の諸氏の手をわずらわした。ここに記して感謝します。

2. 水理現象および解析方針[1)2)]

上層密度ρ_1，下層密度ρ_2と二層密度成層をなしその境界面が湾口敷下ある距離にある湾に密度ρ_0($\rho_0>\rho_1$) の水が進入する場合，進入水は湾口上で不等流となり湾口端からその位置のエネルギーを減じながら内部落下する。その落下プルームは境界面に衝突し，その方向を水平からやや斜め上方にと転じ内部跳水をおこし，その後その層厚をほぼ一定に保ちながら境界面付近を水平に移動する（水理条件の如何によっては落下プルームは境界面を突き抜け底面に直接達する場合もあるがここでは扱かわない)。この間，内部落下，境界面への衝突および内部跳水に際し上層および下層水が激しく混入するが跳水後の混入は非常に小さい。内部跳水後の流下については，しかしながら，その流速が供給に対して小さいため，層厚が時間と共に増加し，これを側面から見た場合先端が薄く後方は厚いクサビとなって進行する。このことは流量が小さい場合特に顕著である。但し内湾部に密度成層がなくプルームが底面を流下する場合にはそのような現象は見られなかった。ここでは内部落下に伴なう混入または層厚変化を扱かうので成層下においては，層厚の時間による変化を無視できるよう内部跳水終了後のある短かい時間内に短かい区間を進行するプルームについての測定をもとに解析を行う。

図－1において内部限界水深発生点（O断面）と内部跳水終了後の位置（b断面）に検査面をとり，この間で

---

* 水産土木工学部

のエネルギー収支を検討する。b断面でのプルームの密度はρ_bであるが取扱いを簡単にするためρ_0，ρ_1およびρ_2の密度が適当に混ざっていると考える（例えば図においてO断面での■がb断面においてもそのまま■を保っている）。

以下の取扱いにおいて解を単純化するために次のような仮定をおく

①各層において圧力は静水圧分布をなす。

②各層において流速は一様分布をなす。

③流入水密度と各層の密度の比は桁落ちのない場合1とみなす。

④湾内での水面勾配は無視し得る。

O断面から流入するエネルギーE_Tは

$$E_T=q_0\left\{\frac{\rho_0 u_c^2}{2}+(\rho_0-\rho_1)g(H+h_c)\right\}\cdots\cdots\cdots(1)$$

b断面を通過するエネルギーのうち，流入水，上層水および下層水起源のものをそれぞれE_{q0}，E_{q1}，E_{q2}とすると，

$$E_{q0}=q_0\Big[\frac{q_0u_b^2}{2}+\frac{g}{h_b}\int_{-h_{b2}}^{h_{b1}}\{(\rho_0-\rho_1)(z+h_2)+(\rho_b'-\rho_1)(h_{b1}-z)\}dz+\Phi\Big]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2,\ a)$$

$$E_{q1}=q_1\Big[\frac{\rho_1u_1^2}{2}+\frac{\rho_1u_b^2}{2}+\frac{g}{h_b}\int_{-h_{b2}}^{h_{b1}}(\rho'_b-\rho_1)(h_{b1}-z)dz+\Phi\Big]\cdots\cdots\cdots\cdots(2,b)$$

$$E_{q2}=q_2\Big[\frac{q_2u_2^2}{2}+\frac{\rho_2u_b^2}{2}+\frac{g}{h_b}\int_{-h_{b2}}^{h_{b1}}\Big\{(\rho_2-\rho_1)z+(\rho'_b-\rho_1)(h_{b1}-z)\Big\}dz+\Phi\Big]\cdots\cdots\cdots(2,c)$$

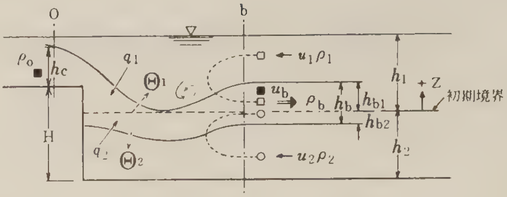
$$\Phi=\frac{g}{h_b}\int_{-h_{b2}}^{0}(\rho_2-\rho_1)zdz=-\frac{gh_{b2}^2}{2h_b}(\rho_2-\rho_1)$$

ここに，q_0，q_1，q_2：湾口流入量，上層からの混入量，下層からの混入量，ρ_0，ρ_b'，ρ_1，ρ_2：流入水密度，プルームの密度，上層水および下層水の密度，u_c，u_b：湾口上における内部限界流速，跳水後のプルーム流速，u_1，u_2：上下層水の混入が起ったために生じる上層および下層での流速，H，h_c，h_2：湾内底からの湾口高さ，内部限界水深，湾内底から初期境界面までの高さ，h_b，h_{b1}，h_{b2}：プルーム厚，境界面上および下のプルーム厚，z：境界面から上方にとった鉛直軸，g：重力の加速度。

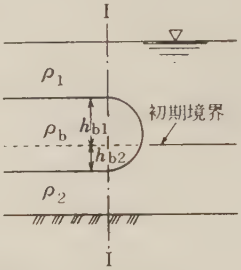
両断面間でのエネルギーの差は熱エネルギーとして失なわれると考えこれをΘとおくと

$$E_T=E_{q0}+E_{q1}+E_{q2}+\Theta\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

これらの式における未知量は上，下層からの連行量q_1，q_2，境界面上，下の層厚h_{b1}，h_{b2}およびエネルギー損失Θの5つである。



図―1　プルーム模式図
Schematic presentation of plume



図―2　プルームの釣合
Balance in the layers

内部跳水後におけるプルーム厚について，流れの遅い現象であるから静水圧分布が成立つとしてプルームの境界面上，下の厚さh_{b1}，h_{b2}は次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}&(\rho_b-\rho_1)gh_{b1}=(\rho_2-\rho_1)gh_{b2}\\&h_{b2}=\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}h_b,\quad h_{b1}=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}h_b\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

ここに，ρ_b：b断面における平均密度，$\varepsilon_1=(\rho_b-\rho_1)/\rho_b$
$\varepsilon_2=(\rho_2-\rho_b)/\rho_b$。

プルーム先端の速度は境界面における内部段波速度に関係すると仮定する

$$u_b=\alpha\sqrt{\varepsilon_1gh_{b1}}=\alpha\sqrt{\varepsilon_2gh_{b2}}=\alpha\sqrt{Egh_b}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

ここに，$E=\varepsilon_1\varepsilon_2/(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$

プルーム内の流量は図―2のI断面の流量で補給されると考えると

$$u_b=\frac{q_0+q_1+q_2}{h_b}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

(5)，(6)式を等しいとおいてh_bが求まる。h_bを湾口における限界水深h_cで無次元表示する。

$$\eta=\frac{h_b}{h_c}=\frac{1}{h_c}\left(\frac{q_0+q_1+q_2}{\alpha}\right)^{2/3}\left(\frac{1}{Eg}\right)^{1/3}\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここで湾口における内部限界水深は次の様に定義すると

$$F_{rc}=\frac{u_c}{\sqrt{\varepsilon_{01}gh_c}}\equiv1,\ q_0=\sqrt{\varepsilon_{01}\ gh_c}\ h_c$$

ここに，$\varepsilon_{01}-(\rho_0-\rho_1)/\rho_0$

これを，(7)式に代入して整理すると層厚変化は

$$\eta=\frac{(1+\xi)^{2/3}}{\alpha^{2/3}(E\varepsilon_0{}^1)^{1/3}}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

ここに，ξ：混入率（$=(q_1+q_2)/q_0$）

また，混入比として，$q_2/q_1=\beta$ を定義すると

$$q_1=\frac{1}{1+\beta}(q_1+q_2),\ q_2=\frac{\beta}{1+\beta}(q_1+q_2)\quad\cdots(9)$$

(1)，(2)式を整理し，$\frac{q_0(\rho_0-\rho_1)gh_c}{2}=\frac{q_0\rho_0{u_c}^2}{2}$で割って無次元化すると

$$e_T=2\frac{H}{h_c}+3\quad\cdots\cdots(10)$$

$$e_{q0}\doteqdot\frac{(1+\xi)^2}{\eta^2}+\eta\left[1-\frac{2f}{1+\xi}(1+a\xi)+B\right]+2\eta_{2c}\quad\cdots\cdots(11a)$$

$$e_{q1}=\left(\frac{\xi}{1+\beta}\right)^3\frac{1}{\left\{\eta_{1c}-\frac{1}{1+\xi}\left((1-f+\frac{\xi}{1+\beta}\right)\right\}^2}\eta$$

$$+\frac{\xi}{1+\beta}\ \frac{(1+\xi)^2}{\eta^2}+\frac{\xi}{1+\beta}\eta\cdot B\quad\cdots\cdots(11,\mathrm{b})$$

$$e_{q2}=\left(\frac{\beta\xi}{1+\beta}\right)^3\frac{1}{\left\{\eta_{2c}-\frac{f}{1+\xi}(1+a\xi)\eta\right\}^2}+\frac{\beta\xi}{1+\beta}$$

$$\cdot\frac{(1+\xi)^2}{\eta^2}+\frac{\beta\xi}{1+\beta}\eta\cdot B+a\left\{1-\frac{2f}{1+\xi}(1+a\xi)\right\}\eta\cdot\xi\quad\cdots\cdots(11\cdot c)$$

ここに，$\eta_{1c}=h_1/h_c,\ \eta_{2c}=h_2/h_c,\ f=(\rho_0-\rho_1)/(\rho_2-\rho_1)$

$$a=\frac{\beta}{1+\beta}/f$$

$$B=\frac{k}{1+\xi}(1+a\xi)-\frac{f}{(1+\xi)^2}(1+a\xi)^2\quad\cdots\cdots(12)$$

$$2\frac{H}{h_c}+3=2\eta_{2c}+\frac{(1+\xi)^3}{\eta^2}+\Big\{(1+k)(1+a\xi)$$

$$-\frac{3f}{1+\xi}(1+a\xi)^2\Big\}\eta+\left(\frac{\xi}{1+\beta}\right)^3$$

$$\cdot\frac{1}{\left\{\eta_{1c}-\frac{1}{1+\xi}\left(1-f+\frac{\xi}{1+\beta}\right)\eta\right\}^2}+\left(\frac{\beta\xi}{1+\beta}\right)^3$$

$$\cdot\frac{1}{\left\{\eta_{2c}-\frac{f}{1+\xi}(1+a\xi)\eta\right\}^2}+\frac{2\Theta}{q_0(\rho_0-\rho_1)gh_c}\quad\cdots\cdots(13)$$

また$\boldsymbol{k}$は分布をなしているプルーム密度 ρ'_b の代りに平均密度 ρ_b を用いたための補正係数

$$\int_{-h_{b2}}^{h_{b1}}(\rho'_b-\rho_1)(h_{b1}-z)dz=k\frac{(\rho_b-\rho_1){h_b}^2}{2}\quad\cdots\cdots(14)$$

内部落下においては湾口上を流入するエネルギーe_Tがe_{q0}，e_{q1} および e_{q2} に配分され更に熱として失なわれることになる。

$\boldsymbol{k}$が定数とすると(13)式における未知数は混入率ξ，混入比βおよびエネルギーの熱としての損失（以下熱損という）Θの3個となる。従ってβおよびΘを何らかの方法で知らねばならない。

まずエネルギー収支式(3)の各項，すなわち上，下層からの連行に伴ない上，下層へ輸送される運動および位置エネルギー等機械エネルギーとして保存される割合と熱損として消耗される割合を実験的に検討する。

若し落下に伴ない混入が起こらないと考えると落下しただけ位置のエネルギーを失うことになる。つまり(11a)式において $\eta=\frac{1}{\alpha^{2/3}(1-f)^{1/3}}$，$\xi=\beta=0$ とおくと

$$e_{q0/\xi=0}=2\eta_{2c}+A_f^2+\frac{1}{A_f}(1+k-3f)\quad\cdots\cdots(15)$$

ここに，$A_f=\alpha^{2/3}(1-f)^{1/3}$

従って失うエネルギーは

$$2\frac{H}{h_c}+3-\left\{2\eta_{2c}+A_f^2+\frac{1}{A_f}(1+k-3f)\right\}\cdots(16)$$

更にこれをe_Tで割ったものをエネルギーの仮想の損失率L_iとすると

$$L_i=\frac{2\frac{H-h_2}{h_c}+3-\left\{A_f^2+\frac{1}{A_f}(1+k-3f)\right\}}{2\frac{H}{h_c}+3}\quad\cdots\cdots(17)$$

内部落下に伴ない混入が起きないとしてもe_{q0}に関しては位置のエネルギーが残るから

$$e_{q0}\geqq e_T(1-L_i)\quad\cdots\cdots(18)$$

また損失比に応じて上層水の混入は起こると考えると上層水へのエネルギー配分はL_iと関数関係にあることになり，更に下層水へのエネルギー配分もL_sと関数関係にあることが考えられる。従って実験によってこれらの関係，更には熱損との関係を検討する。

なお湾内部に密度成層のないときは，以上の式において $h_2=\eta_{2c}=0$，$q_2=\beta=0$，$\rho_2=\infty$，$a=f=0$ とおくと

$$\eta=\frac{(1+\xi)}{\alpha^{2/3}}=\frac{(1+\xi)}{A}\quad\cdots\cdots(8')$$

$$e_T=\frac{(1+\xi)^3}{\eta^2}+\frac{\xi^3}{(\eta_{1c}-\eta)^2}+\eta(1+k)$$

$$+\frac{2\Theta}{q_0(\rho_0-\rho_1)gh_c}\quad\cdots\cdots(13')$$

$$L_i=\frac{2\frac{H}{h_c}+3-\left(A^2+\frac{1+k}{A}\right)}{2\frac{H}{h_c}+3}\quad\cdots\cdots(17')$$

となる。

3.　実験の方法

実験は2つの水槽を用いて行った。1つは長さ14m，幅0.2m，深さ0.6mの両面ガラス張り水槽に，高さ0.4mの湾口模型を設置して定常的に塩水を流すもので定常

実験と呼ぶ。いま1つは長さ10m，幅0.5m，深さ1.0mの水槽を外海とみなし，これに接続する長さ6.0m，幅0.5m，深さ0.6mのアクリル水槽を湾内とみなしプランジャー型起潮装置で模型潮汐を発生させたもので潮汐実験と呼ぶ。いづれにおいても湾内部は成層のある場合および成層なしの場合の実験を行った。実験は数年次にわたったため同じ水槽でも条件等が多少異なる。

内部落下流実験における流れの大きさは，流入水を起源とするプルームの流速は数cm/sで熱線流速計で測定可能であるが混入に伴ない生起する上層および下層での流速は数mm/sでその測定が困難であったので後述するようプルームをゲート間に閉じ込め現象を止めた後測定するような測定法も行った。

潮汐実験においては現象が非定常であり一般には取扱かいが複雑となる。ここでその非定常項のオーダーを検討してみる。即ち図―3において限界水深発生位置と内部跳水終了後の位置に検査面をとり，両検査面間でのエネルギーの時間変化が単位時間当りの流入エネルギーに比べてどの程度かを検討する[2]。

検査面Oから流入するエネルギー E_T は，(1)式で与えられる。両検査面間に存在する平均エネルギーは検査面間距離を l とすると次式となる。

$$E_n=\frac{h_c+h_b}{2}\,l\left\{\frac{1}{2}\,\frac{\rho_0+\rho_b}{2}\left(\frac{u_c+u_b}{2}\right)^2+g\left(\frac{\rho_0+\rho_b}{2}-\rho_1\right)\frac{h_c+H+h_b}{2}\right\}\cdots\cdots(18)$$

実験において最大流量は15cc/s，周期360sであり，その他のオーダーは

$$\rho_0=O(10^0),\ u_c,\ u_b=O(10^0),\ \rho_0-\rho_1=O(10^{-3\sim-2})$$

$$g=O(10^3).\ H=O(10^1),\ l=O(10^1),\ q_0=O(10^{0\sim-1})$$

であるので

$$E_T=O(10^{2\sim3})$$

$$E_n=O(10^3)$$

両検査面間のエネルギーの時間変化は

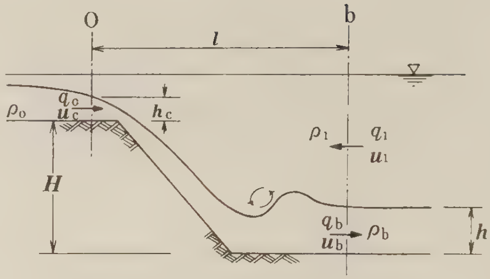
$$\frac{dE_n}{dt}\simeq\frac{O(10^3)}{180}=O(10^1)$$

$$\therefore\frac{dE_n}{d_t}<E_T$$

つまり両検査面間のエネルギーの時間変化は流入エネルギーに比べて小さい。しかしそれは非定常項を無視できる程度に十分小さいのではないが，ここでは取扱かいを簡単にするため無視することとする。成層のある場合も同様に取扱かう。

a　定常実験成層なし[3]

湾口模型は長さ1.2m，高さ0.4m，落下高さは別途底板を設けることで調節した。



図―3　プルーム模式と記号

Representation of internal fall and symbols

流量は高水槽（定水位）に接続した三角堰で測定し，塩水密度はあらかじめ密度検定を行った塩分計で測定した。流入水はあらかじめ染料（ローダミンB，ウラニン）で着色してあるが，流速は水素気泡発生装置による気泡の動きを写真撮影する方法で，プルーム先端速度は先端位置の時間的変化から求め，層厚は同じく水素気泡および染料から読みとった。

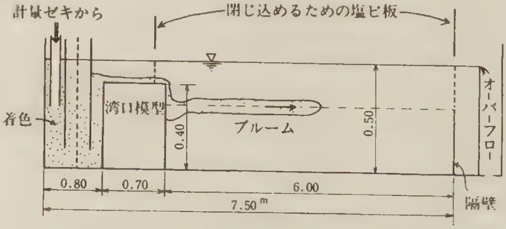
b　定常実験成層あり[4]

湾口模型は長さ0.7m，高さ0.4m。（図―4参照）

成層の形成は，水槽下流側に高さ調節可能の隔壁を設け，まず下層密度ρ_2の塩水を実験部に貯留する。次に上層水を隔壁上端から静かに実験部下層水上へ流入させて所要成層を形成させた。また下層水の越流を防ぐため成層形成後に隔壁板を追加して隔壁は嵩上げした。

実験は内湾域に相当する実験区間（湾口端から6.0m）内の密度の鉛直分布を測定し所要条件下で着水塩水をある時間（流量によって異なる）流入させた後，湾口上および下流端（6.0m地点）のゲートを閉じて実験区間内にプルームを閉じ込める。1時間程経ってから再び実験区間内の密度分布を測定する。流量は三角堰で，密度はで採水して比重計，プルーム先端速度は着色水の進行状態から求めた。

内部落下に伴なう上層および下層からの混入量等は実験前後の密度変化から算出した。



図―4　定常実験模式

Schematic presentation of test basin for constant flow

即ち，落下に伴ない混入がないと考えると密度ρ_0の流入水は境界面上にh_{b0}の厚さで存在することになる（実験において上層水のみが流出するようになっている），

$$h_{b0}=\frac{q_0\tau_0}{l_0}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

ここに，τ_0：塩水流入時間，l_0：内湾相当部長さ。

実際には上・下層から混入があり初期境界面をはさんで上方にζ_1，下方にζ_2の厚さのプルームとなる。従って上・下層からの混入量は次式のように計算される。（図５参照）

$$q_1=\frac{\zeta_1-h_{b0}}{h_{b0}}q_0,\quad q_2=\frac{\zeta_2}{h_{b0}}q_0\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

またプルーム進行時のプルーム厚はその先端速度cから次のように求めた。

$$h_b=\frac{q_0+q_1+q_2}{c}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

c　潮汐実験成層なし[5)]

実験は長さ0.7m，高さ0.3m，斜面勾配１：２の湾口模型を設けて行った。実験に先だち湾口上の仕切板で湾内・外を隔離し，水位を一致させておく，模型潮汐は上げ潮初期から満潮を経て干潮となるまでの一潮汐を与えるが実験は起潮装置の作動と同時に湾口上の仕切板を上げ外海側の着色塩水を流入させる。転流時以降は外海側の貯留部の扉を開け流出水（全部湾内水）が貯留部に流入するようにして外海水が稀釈されるのを防いだ。実験終了時直ちに湾口上の仕切板を閉じる。

プルームが安定してから採水し，比重計で密度分布を測定し，湾口傾斜を考慮して層厚h_bは次のように求めた。

$$h_b=\frac{(2l+ih'_b)h'_b}{2L}$$

ここに，h_b：湾口傾斜を考慮した層厚，h_b'：密度分布から読みとった層厚，L：湾内表面奥行，l：湾内底面奥行，i：湾口傾斜，（図－６参照）

混入量は層厚変化から求めた。即ち，総流入量をQ_0とし，総混入量をQ_1とおくと

$$Q_B=Q_0+Q_1=h_bL\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

$$Q_0=\zeta'L\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

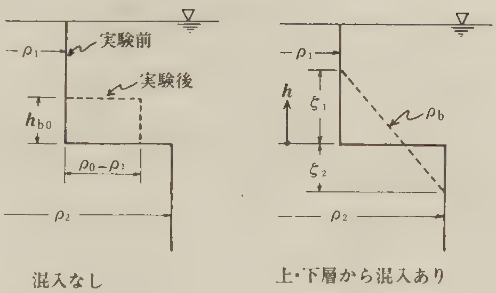
$$Q_1=(h_b-\zeta')L\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

ここに，ζ'：内湾水位変化

実験は一潮汐について行っているが下げ潮時にはこれらの量に変化がないので流入時である$T/2$で平均すると

$$q_b=\frac{2Q_B}{T}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

$$q_0=\frac{2Q_0}{T}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$



$$q_1=\frac{\zeta_1-h_{b0}}{h_{b0}}q_0$$

$$q_2=\frac{\zeta_2}{h_{b0}}q_0$$

図－５　混入量計算模式

Definition sketch of entrainments

$$q_1=\frac{2Q_1}{T}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

このように，混入量等は算出した。

d　潮汐実験成層あり

水槽はｃ，成層なしに用いたものと同じものであるが成層形成に便利なように湾奥部に仕切板を設け湾の奥行を短かくしている。密度成層の形成は**b**に述べたと同様に行った。

測定項目も**c**に述べたものと同様であるが密度分布は導電率計によって測定した。

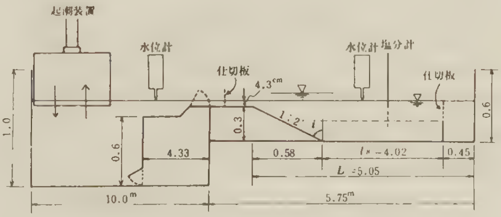
この場合も混入量は層厚変化から求めた，初期境界面より上のプルーム厚をh'_{b1}，下層厚をh'_{b2}とおくと，総流入量をQ_0，上層からの総混入量をQ_1，下層からをQ_2，はそれぞれ次のように求められる。

$$Q_0=\zeta'L\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

$$Q_1=\left\{\left(h_2+\frac{h'_{b2}}{2}\right)i+l_s\right\}h'_{b1}-Q_0\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$Q_2=\left\{\left(h_2-\frac{h'_{b2}}{2}\right)i+l_s\right\}h'_{b2}\ \cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

流入時における平均値は，以上を$T/2$で割って得られる。



図－６　潮汐実験水槽模式

Schematic presentation of tidal experimentation

表一1　実験組合せ一覧

Test run

	成層なし		成層あり	
	定常実験	潮汐実験	定常実験	潮汐実験
湾口水深 h_0(cm)	10	(4.3)	10	(4.3)
湾口敷までの高さ　H(cm)	10，40	30.7	40	30.7
落下高H-h_2(cm)	10，40	30.7	5，10，15	5.7,10.7
上層厚　h_1(cm)	—	—	15,20,25	(10，15)
下層厚　h_2(cm)	—	—	35,30,25	25，20
限界水深 h_c(cm)	0.49～14.2	1.51～3.24	1.71～4.49	1.07～3.88
流　量　q_0(cc/s)	0.9～80.0	5.5～8.0 ζ'=1.95～2.85cm T≒360 S	4.4～20.0	2.7～9.7 ζ'=0.95 3.46 T～360
プルーム速度　c(cm/s)	1.6～6.6	—	2.0～4.0	1.8～3.4
$\rho_0-\rho_1$	0.001～0.030	0.0017～0.0079	0.0022～0.0062	0.0009～0.0102
$\rho_2-\rho_1$	—	—	0.0054～0.0097	0.0031～0.0105
$(\rho_0-\rho_1)/(\rho_2-\rho_1)$	—	—	0.277～0.872	0.290～1.135

$$q_0=\frac{2Q_0}{T} \quad\cdots\cdots(31)$$

$$q_1=\frac{2Q_1}{T} \quad\cdots\cdots(32)$$

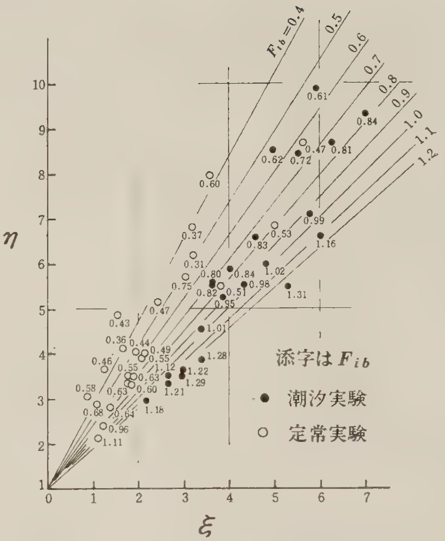
$$q_2=\frac{2Q_2}{T} \quad\cdots\cdots(33)$$

以上に述べるように4種類の実験を行ったがその組合せ等は表一1に示すとおりである。

4.　実験結果とその考察

4.1　密度成層のない場合

まず実験における層厚変化と混入率の関係を（8′）式に従って整理してみると図一7のようになる。図によると両者の関係は内部フルード数が定まると（8′）式で表現されることを示しているが，その内部フルード数は，0.4～1.3の範囲に広がっており更にこれは定常実験では小さく，潮汐実験では大きくなっている。

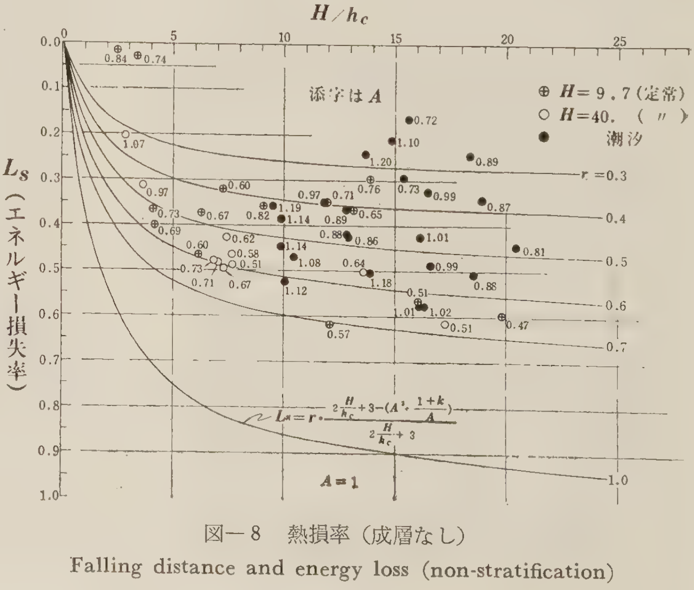


図一7　ηとξの関係（成層なし）

Relation between η and ξ (non-stratification)

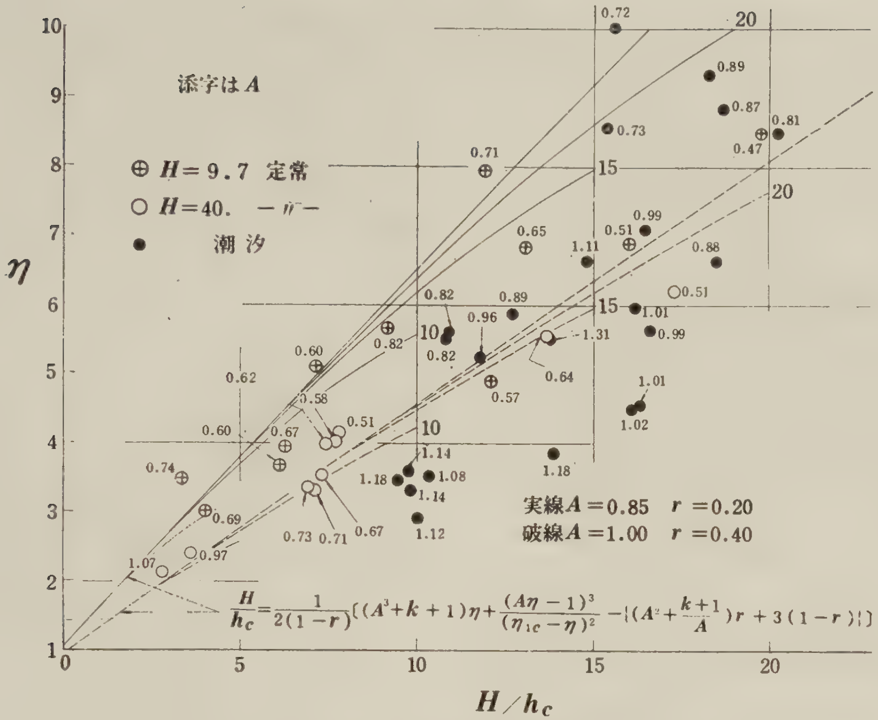
その原因としては測定法の差違によるものと思われる。

（13′）式から逆算して得られる熱損率は0.03～0.60の範囲にありこれと落下高との関係を示したのが図一8である。図には，また（17′）で示される落下途中に混入が起こらなかったと考えた場合の熱損曲線も描いてあるが，実験結果はいずれもこの曲線からはみ出してなく，むしろ曲線のある割合になっていることを示している。その割合（損失比rと呼ぶ）は，0.3～0.6とこれもそのバラツキは大きいが，そして定常実験の方が潮汐実験に比べ



図一8　熱損率（成層なし）

Falling distance and energy loss (non-stratification)



図—9　落下高と層厚変化（成層なし）

Falling distance and thickness of the plume (non-stratification)

て損失比は大きく前者で0.55，後者で0.4程度に読みとれる。（成層なしの場合の密度分布の補正係数kは測定していないのでここでは成層ありの場合の平均値$k=1.3$を用いて計算している。）

図によるとrにはかなりのバラツキがあるがこれを実験誤差と見なせば熱損率は一般的に次式で与えられるであろう。（図には$A=1$とおいた次式の曲線を示す）。

$$Ls=r\frac{2\frac{H}{h_c}+3-\left(A^2+\frac{1+k}{A}\right)}{2\frac{H}{h_c}+3}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(34)$$

また，定義によりこれは$2\Theta/\{q_0(\rho_0-\rho_1)gh_c\}$を$2\frac{H}{h_c}+3$で割ったものであるから(34)および(8′)式を(18′)式に代入してηについて整理すると(35)式となる。

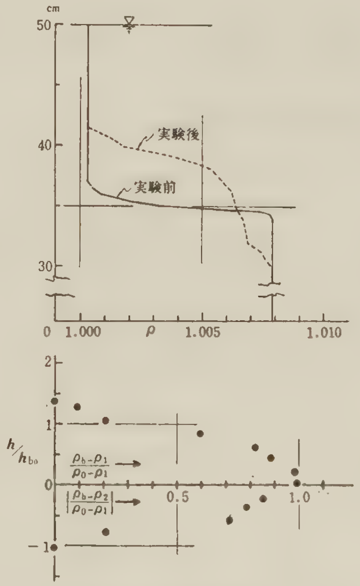
$$(2A^3+1+k)\eta^3-\{3A^2+2\eta_{1c}(A^3+1+k)+C\}\eta^2$$
$$+\{3A+\eta^2_{1c}(A^3+1+k)+2C\eta_{1c}\}\eta-(1+C\eta_{1c}^2)=0$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots(35)$$

ここに，

$$C=(1-r)\left(2\frac{H}{h_c}+3\right)+r\left(A^2+\frac{1+k}{A}\right)$$

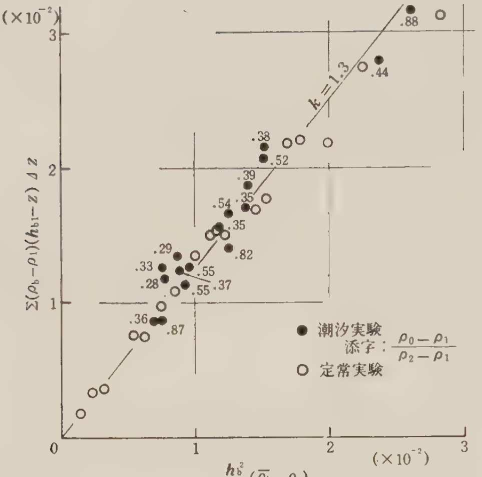
または，

$$\frac{H}{h_c}=\frac{1}{2(1-r)}\left[\left(A^3+1+k\right)\eta+\frac{(A\eta-1)^3}{(\eta_{1c}-\eta)^2}\right.$$
$$\left.-\left\{\left(A^2+\frac{1+k}{A}\right)r+3(1-r)\right\}\right]\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(36)$$



図—10　混入による密度変化の一例

An example of density change due to entrainment



図—11　補正係数 k

Factor k

つまり層厚変化は内部フルード数および損失比 r が定まると(35)式の3次方程式の実根として計算されることになる。

実験における落下高と層厚変化の関係を図—9に示す。図にはまた $A=0.85$ および 1.00，$r=0.2$ および 0.4 とおいた(36)式の曲線も示す。(36)式は A および r を含む H/h_c の関数で，A 自体がバラツクこともあって計算値との比較が簡単に行なえない。損失比を $r=0.3$ とすると実験値を説明するようである。また(36)式は η_{1c} が変化することによって何本もの枝分れした曲線となるが，$\eta_{1c}>H/h_c$ の限界をもつ。A が小さいと枝分れの範囲が大きくなる。

4.2　密度成層のある場合

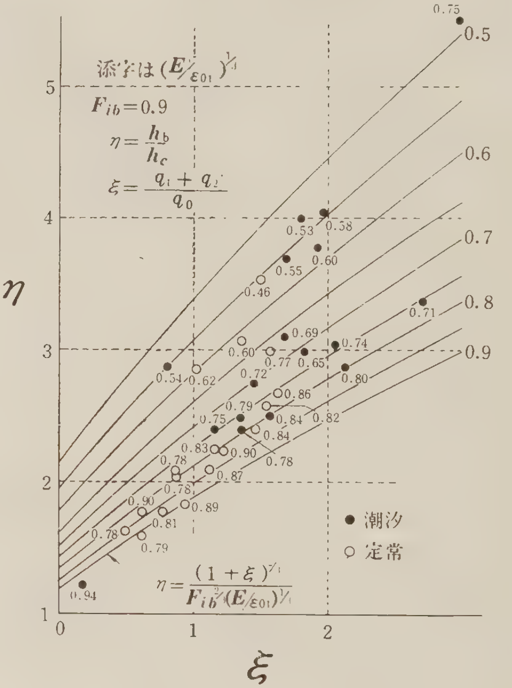
内部落下に伴なう混入による密度変化およびその無次元化したものは図—10に示すようである。無次元化したものの面積は正確に1とならねばならないがこの例ではやや1より大きくなっている。（測定精度のせいか常に2割程度大きい。）

混入に伴なうプルーム内の密度分布を表わす補正係数 k は図—11の横軸と縦軸の比であるが図に示す通りほぼ一定で

$$k=1.3$$

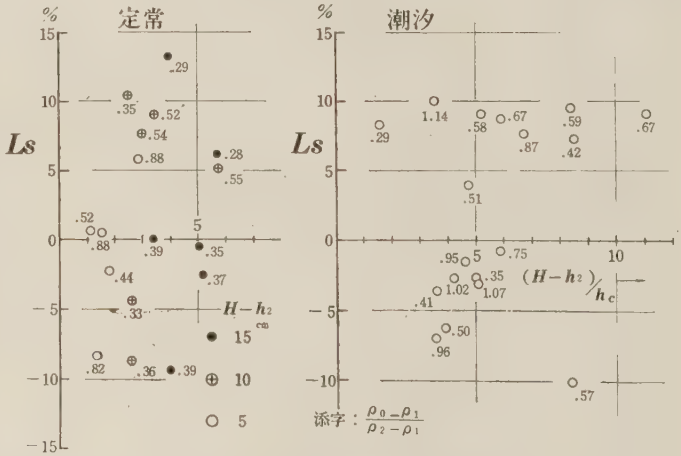
と読みとれる。（$k=1.3$ ということは密度分布がほぼ直線的であることを意味する。直線分布の場合 $k=4/3$。）

層厚変化と混入率の関係は(8)式で示されるが実験結果をこのように表わしたのが図—12である。式における α は，(5)式からわかるように内部フルード数であるがこれはもはや混入が起こらなくなった状態でのものを示す。実験におけるこの内部フルード数は定常実験では0.74～1.0，潮汐実験では0.6～1.3であったが，図ではこれを0.9とおいた曲線を描いているが実験結果とかなりよく合っている。



図—12　η と ξ の関係（成層あり）

Relation between η and ξ (stratification)



図—13　落下高と熱損率（成層あり）

Falling distance and energy loss (stratification)

(13)式で逆算した熱損（更にe_Tで割ったもの）を図―13に示す。図によるとそれは13.2%～−10.0%）の範囲にありその平均は1.6%と小さく，正負のケースがほぼ等しいので，これを誤差とみなすと，エネルギーの熱損Θは無視できる。つまり，成層下においては落下により減じた位置のエネルギーは上層水，下層水の混入エネルギーにほとんど変換されることになり成層なしの場合と大きく異なる。成層なしの場合はプルームが直接底面に衝突するが，その際下層からの混入が起こらないから熱損が大きくなるものと考えられる。

次にエネルギー配分について検討してみる。まず，熱損をゼロと見なして(13)式をe_Tで割って(37)式となる。

$$\varepsilon_q+\varepsilon_{q1}+\varepsilon_{q2}=1 \cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

プルームの持つエネルギーは（2･a）式に見られるように混入に伴なう位置エネルギーの増加があり(18)式において等号とならない。いまその増加係数をr_0と考えると

$$\varepsilon_{q0}=r_0(1-L_i) \cdots\cdots\cdots\cdots(38)$$

実験結果では平均値として$r_0=1.126$を得た。

次に上層水に伝達されるエネルギーε_{q1}は落下に伴ない失ったエネルギーに比例すると考えると

$$\varepsilon_{q1}=r_1(1-\varepsilon_{q0}) \cdots\cdots\cdots\cdots(39)$$

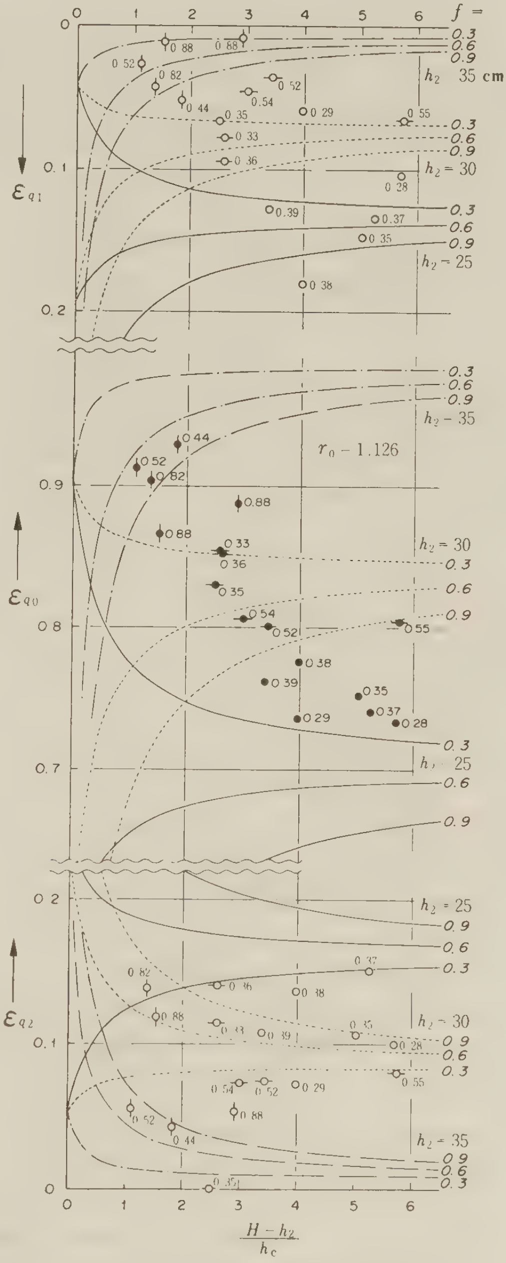
実験結果ではこのr_1は平均値として0.45であった。また下層水へ伝達されるエネルギーε_{q2}は

$$\varepsilon_{q2}=1-(\varepsilon_{q0}+\varepsilon_{q1})=(1-r_1)(1-\varepsilon_{q0}) \quad\cdots\cdots(40)$$

このように考えたエネルギー配分曲線と定常実験の場合の実測値を境界面までの落下高$\dfrac{H-h_2}{h_c}$との関係で示すと図―14のようになる。図におけるカーブは，$r_0=1.126$，$r_1=0.45$として，ε_{q1}に対しては(39)式，ε_{q0}に(38)式ε_{q2}に(40)式でそれぞれ計算したものである。カーブと実測値との対応は，実線に対して○または●，鎖線-○-，-●-，一点鎖線ϕ，ɸである。図によると各エネルギーはバラツキはあるものの落下高によって明らかに分けられる。また曲線との適合度はあまり良くないが添字としたf（$=(\rho_0-\rho_1)/(\rho_2-\rho_1)$）から見て傾向としては合っている（尚，模型潮汐下の実験も同様であった）。また図では落下高が小さくエネルギーが密度条件fによって大きく異なる個所の実験値が少ないが，これは落下高を小さくするためには密度差を小さく流量を大きくせねばならず，ポンプ容量，密度測定技術等の制約で実験できなかったためである。

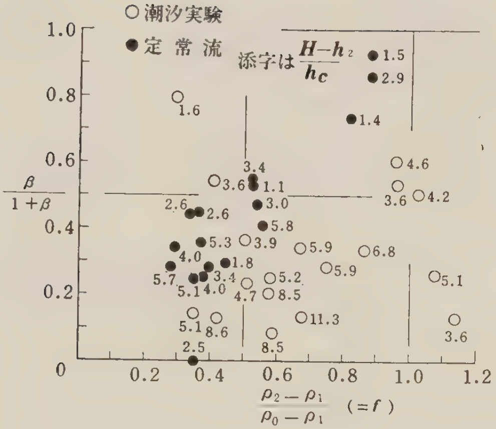
(13)式における係数aつまり$\beta/1+\beta$とf（$=(\rho_0-\rho_1)/(\rho_2-\rho_1)$）の関係が明らかになり，(13)式右辺第4，5項の和がβを含まない形であれば，熱損Θは無視できるから(13)式は解けることになる。係数aを実験結果で示すと図―15のようになる。図における傾斜が(13)式中の係数aとなる，図において定常流実験では例外的なものもあるが，$a=1.0$と読みとれる。潮汐実験ではバラツキが大きく関係の有無については何ともいえない。

aが一定であればその定義からβが得られるので，全混入率がわかると上層および下層からの混入率は次式で計算される。



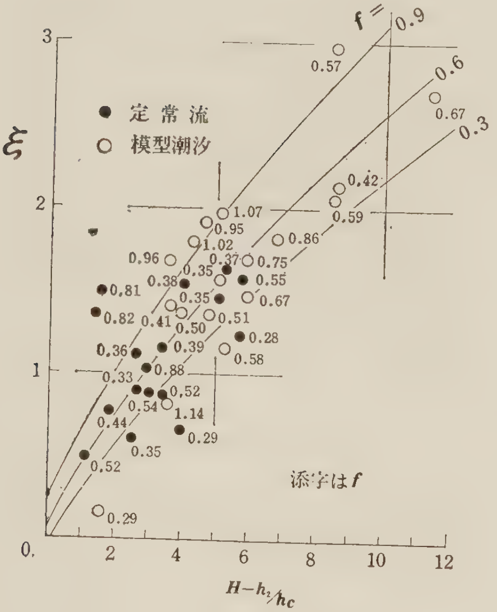
図―14　エネルギー配分

Redistribution of inflow energy



図—15 $\frac{\beta}{1+\beta}$ と f の関係

Relation between $\frac{\beta}{1+\beta}$ and f



図—16 落下高と全混入率

Falling distance and total entrainment

$$\xi_1=\frac{1}{1+\beta}\xi,\quad \xi_2=\frac{\beta}{1+\beta}\xi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (41)$$

次に落下高と全混入率の関係を図—16に示す。

図によると全混入率 ξ は落下高が大きい程大きいことを示している。このことを，流入するエネルギーに応じて全混入は起こりしかも落下途中および衝突時の熱損はないと解釈し，更に受容液には成層なしと扱かえるよう(13)式の簡略化をはかる。つまり(13)式の右辺第4，5項の和が $\xi^3/(\eta_{1c}-\eta)^2$ で表わされると考える（η が η_{1c} または η_{2c} に近づくと第4，5項は無視できなくなるが $\eta_{1c}>(H-h_2)/h_c$ の条件のためこれらの項は大きくならずこのような簡略化ができる)。更に（8）式を代入すると(13)式は

$$2\frac{H-h_2}{h_c}+3=K^2(1+\xi)^{5/3}+\Big\{(1+k)(1+a\xi)-\frac{3f}{1+\xi}(1+a\xi)^2\Big\}\frac{(1+\xi)^{2/3}}{K}+\frac{K^2\xi^3}{\{K\eta_{1c}-(1+\xi)^{2/3}\}^2}\cdots\cdots\cdots\cdots(42)$$

ここに，$K:(\approx(F_{ib})^{2/3}\cdot(E/\varepsilon_{01})^{1/3})$ であるが簡略化したことも含めた係数。式中においてが定数ならば(42)式は解けることになる。

図—15から a を定数とおくことに多少問題はあるがこれを定数と考え $a=1.0, K=1.56$*) とおいて(42)式を解いた曲線も図—16に示す。図によるとバラツキはあるものの曲線は実験値と傾向として合っていることがわかる。（なお $a=0.6$ とおいても図に示したカーブと大きくずれることはない)。

なお(30)式右辺第3項の分母 η_{1c} によって曲線は実際は複数の曲線群となるが $\eta_{1c}>(H-h_2)/h_c$ の条件によって，図に示す曲線で代表できる。

5. 結 論

内部落下流における層厚変化または混入率について実験的に研究を行った。

層厚変化 (η) は（混入率と (ξ) の関係は(8)式で表わされる）(13)式にあるよう上，下層からの混入比 β，および熱損 Θ を未知数として流入エネルギーの関数として表現される未知数を明らかにすることが目的である。

成層のない場合

① η と ξ との関係は図—7に示すよう(8′)式を満足しているといえる。

② 熱損率は図—8に示すよう，落下高の関数でありこれは内部落下に伴ない混入が起こらない（完全損失）と考えた場合のある比率 r で表わされる。すなわち(34)式が成立つ，そして

$r=0.3\sim0.6$

を得た。

③ 熱損が(34)式で表わされると η は(35)式の3次方

---

*) $(H-h_2)/h_c=0$ の場合，$\xi=0$ の筈であるから(42)式中の係数は次の制限を受ける。

$$K^3-3K+(1+k)-3f=0$$

$K=1.56$ は $f=0.6$ とおいた場合の上式の解にほぼ等しいので用いた。

程式の根として図—9のように表わされる。

成層のある場合

① プルーム内の密度分布を表わす補正係数として図11に示すよう

$k=1.3$

を得た。

② ηとξの関係は図—12に示すよう(8)式で表わされる。

③ 本実験において熱損はゼロと見なせる。すなわち失なう位置エネルギーは全て混入に使われる。

④ そのエネルギーのプルームへの配分は失なう位置エネルギーにある割増し率r_0をもって(38)式のように，上層水へはプルームへの配分を差引いたもののうちある比率r_1によって(39)式のように，下層水へは全体から前2者分を差引いた分として(40)式のように与えたが，実験結果との比較ではかなりのバラツキはあるが傾向としては合っている。

⑤ 落下高と全混入率の関係は図—16に示す。熱損をゼロと見なし，更に$\dfrac{\beta}{1+\beta}\Big/\dfrac{\rho_0-\rho_1}{\rho_2-\rho_1}$が一定ならば全混入率は(42)に示すよう落下高の方程式の根として概略推算できる。

以上内部落下流における実験結果を考察したが，測定が困難で精度がよくないため問題として残る点が多い。

(8)式のηとξの関係における内部フルード数（内部跳水が終了し混入が起こらなくなった時点でのものではぼ定数と考えられる）のバラツキは検討されねばならない。

この研究においてゼロと見なした成層のある場合の熱損についても下層厚が小さくなり条件が成層なしに近づけば熱損は無視できなくなるがこの関係も明らかにされねばならない。

参考文献

1) 乃万俊文・中村充・吉沢裕・谷藤康造:湾口密度流—内部落下流における湾内水の混入と層厚変化—，第21回海岸工学講演会論文集，1974

2) 乃万俊文・熊谷健蔵：模型潮汐下における湾口密度流，昭和54年農土学会大会講演会要旨集，1979

3) 乃万俊文・中村充・桜井敏幸：湾口密度流—内部落下流におけるエネルギー損失—，昭和52年農土学会大会講演会要旨集，1977

4) 乃万俊文・中村充・島川良英：混口密度流—成層下における内部落下流(2)—，昭和54年農土学会大会講演会要旨集，1979

5) 2)に同じ

Experimental study on Internal Fall

By

Toshifumi NOMA and Makoto NAKAMURA

Summary

Sea water exchange rate has an importance to the water quality in a bay. When sea water inflows into a density stratified bay, connected to outer sea with a tidal inlet whose depth is lesser than that of the bay, the higher density of inflow causes internal fall at the end of inlet and results density and thickness change of the inflow water (hereafter called the plume).

Phenomena caused by the inflow of higher density salt water into a channel, as shown in Fig. 1, are as follws : Inflow (with density ρ_0) is non-uniform flow on the inlet and falls at the end, and internally jumps at nearby initial boundary or at the bottom of the channel and laterally removes. Through the fall and jump, the plume entrains upper layer water (ρ_1) and/or lower layer water (ρ_2) and changes its density ρ_0 to ρ_b and increases layer thickness. The entrainments also induce flows in upper and lower layers.

Taking a point on the inlet, where a internal critical depth is seen, as a control section, O, the inflow energy flux is given by

$$E_T=q_0\left\{\frac{\rho_0 u_c^2}{2}+(\rho_0-\rho_1)g(H+h_c)\right\} \cdots\cdots(1)$$

where, q_0 : inflow rate, u_c : internal critical flow velocity, H : inlet height over the bottom, h_c : height of internal critical flow, and g : gravitational acceleration.

Another control section is selected at b adequately lee of the internal jump where the entrainment is not seen. Energy flux of b is calculated by Eq. (2).

Defining that the supposed energy loss between O and b is Θ, Eq.(3) is obtained. Considering the mass conservation, relation between the plume thickness, η, and the entrainment rate, ξ, can be given by Eq.(8), and Eq. (3) is adimensionally expressed by Eq.(13). In the equation, there are two unknowns, energy loss, Θ, and entrainment ratio lower/upper layer, β.

Results of the experiments reveal as follow :

When there is stratification in the inner bay portion (case of stratification), energy loss can be neglected. Without stratification, it depends on the falling distance and is empirically estimated by Eq.(34).

$$L_s=r\frac{2\frac{H}{h_c}+3-\left(A^2+\frac{1+k}{A}\right)}{2\frac{H}{h_c}+3} \cdots\cdots(34)$$

where, r: empirical coefficient ($\fallingdotseq 0.55$).

Obtainning the energy loss, for case of non-stratification where β is zero, the layer thickness can be mathematically calculated by Eq. (35).

For case of stratification, the unknown β remains still unknown. Supposing that there is certain relation between relative density difference and the entrainment ratio, the total entrainment is obtained by Eq. (42).

$$2\frac{H-h_2}{h_c}+3=K^2(1+\xi)^{5/3}+\left\{(1+k)(1+a\xi)-\frac{3f}{1+\xi}(1+a\xi)^2\right\}\frac{(1+\xi)^{2/3}}{K}+\frac{K^2\xi^3}{\{K\eta_{1c}-(1+\xi)^{2/3}\}^2} \qquad \cdots\cdots(42)$$

付表－1（定常実験成層なし）

No.	H	h_1	q_0	ρ_0	ρ_1	h_c	h_b	u_b	ρ_b	η	q_b	ξ	F_{ib}	L_s
1	40.00	51.30	25.06	1.0250	0.9970	2.863			1.0100					
2	40.00	51.80	20.18	1.0160	0.9970	2.811			1.0066					
3	40.00	51.70	11.13	1.0130	0.9970	2.000			1.0058					
4	40.00	50.80	14.80	1.0060	0.9970	2.923	16.10	4.44	1.0026	5.507	71.48	3.830	0.473	0.447
5	40 00	52.10	40.51	1.0065	0.9970	5.619	18.70	6.19	1.0024	3.328	115.75	1.857	0.623	0.423
6	40.00	51.60	28.42	1.0030	0.9970	5.165	21.00	4.00	1.0020	4.066	84.00	1.956	0.395	0.398
7	40.00	51.80	27.07	1.0025	0.9970	5.146	21.20	3.40	1.0017	4.119	72.08	1.663	0.344	0.422
8	40.00	50.60	7.36	1.0015	0.9970	2.309	14.30	2.17	1.0008	6.194	31.03	3.216	0.298	0.566
9	40.00	52.10	29.17	1.0070	0.9975	4.515			1.0032					
10	40.00	51.90	41.72	1.0080	0.9970	5.460	19.20	6.02	1.0041	3.517	115.58	1.770	0.522	0.436
11	40.00	51.40	34.81	1.0050	0.9970	5.376	21.50	5.06	1.0027	3.999	108.79	2.125	0.462	0.362
12	40.00	53.10	44.81	1.0020	1.0005	11.102	26.40	3.76	1.0014	2.378	99.26	1.215	0.798	0.245
13	40.00	52.70	47.56	1.0150	1.0007	5.472	30.30	3.31	1.0013	5.537	100.29	1.109	0.760	0.255
14	40.00	52.40	44.60	1.0080	0.9980	5.893	19.80	6.24	1.0034	3.360	123.55	1.770	0.611	0.409
101	9.70	20.60	11.01	1.0100	1.0000	2.320	7.07	2.91	1.0057	3.047	20.57	0.869	0.464	0.320
102	9.70	20.20	2.44	1.0050	1.0010	1.151	6.33	1.56	1.0017	5.498	9.87	3.042	0.749	0.243
103	9.70	20.40	6.18	1.0100	1.0000	1.579	5.79	2.41	1.0059	3.667	13.95	1.258	0.418	0.391
104	9.70	20.40	3.74	1.0060	1.0000	1.338	6.84	1.88	1.0037	5.114	12.86	2.438	0.378	0.231
105	9.70	20.20	3.38	1.0095	1.0000	1.074	6.44	2.38	1.0025	5.996	15.33	3.535	0.600	0.209
106	9.70	20.70	13.31	1.0075	1.0000	2.896	10.07	3.82	1.0037	3.477	38.47	1.890	0.633	0.082
107	9.70	19.80	2.67	1.0220	1.0000	0.697	6.05	2.93	1.0065	8.686	17.73	5.639	0.474	0.212
108	9.70	21.80	32.05	1.0160	1.0000	4.053	11.42	6.64	1.0127	2.818	75.83	1.366	0.560	0.096
109	9.70	20.80	13.64	1.0150	1.0010	2.397	6.95	4.11	1.0091	2.900	28.56	1,094	0.556	0.297
110	9.70	19.90	1.71	1.0150	1.0010	0.601	4.10	1.76	1.0087	6.817	7.22	3.208	0.318	0.508
111	9.70	20.70	7.26	1.0165	1.0015	1.539	6.01	3.72	1.0093	3.905	22.36	2.080	0.551	0.295
112	9.70	19.90	2.58	1.0180	1.0010	0.741	5.09	3.04	1.0077	6.870	15.47	4.998	0.528	0.291
113	9.70	20.40	3.05	1.0200	1.0010	0.799	3.88	2.00	1.0067	4.858	7.76	1.544	0.431	0.565
114	9.70	19.50	1.60	1.0240	1.0010	0.488	4.12	4.12	1.0100	8.440	16.97	9.609	0.687	0.133

付表－2（定常実験成層あり）

No.	q_0	T	ρ_0	ρ_1	ρ_2	h_1	h_2	h_c	$\frac{H-h_2}{h_c}$	h_{b1}	h_{b2}	h_b	u_b	ρ_b	η	ξ	β	F_{ib}	L_s	$(E/\varepsilon_{01})^{1/3}$
1	13.25	175.0	1.0051	1.0017	1.0107	25.805	25.00	3.755	3.994	8.232	1.488	9.719	3.457	1.00480	2.588	1.536	0.338	0.815	-0.093	0.824
2	8.50	194.0	1.0052	1.0020	1.0107	25.625	25.00	2.851	5.262	5.935	1.696	7.631	2.918	1.00520	2.677	1.620	0.561	0.755	-0.025	0.856
3	10.75	273.0	1.0043	1.0021	1.0097	25.495	25.00	3.776	3.972	5.792	0.910	6.703	2.656	1.00400	1.775	0.656	0.522	0.814	0.133	0.904
4	16.70	148.4	1.0047	1.0014	1.0098	25.555	25.00	4.425	3.390	8.521	1.458	9.979	3.606	1.00450	2.255	1.155	0.375	0.844	0.001	0.825
5	6.40	240.0	1.0048	1.0025	1.0108	25.760	25.00	2.633	5.697	4.955	0.929	5.884	2.422	1.00520	2.235	1.227	0.402	0.780	0.062	0.901
6	9.05	205.0	1.0048	1.0016	1.0108	26.150	25.00	2.971	5.048	6.101	1.033	7.134	3.118	1.00460	2.401	1.458	0.323	0.862	-0.005	0.837
7	10.20	169.0	1.0069	1.0040	1.0094	20.725	30.00	3.328	3.005	5.271	1.506	6.777	2.829	1.00690	2.036	0.880	0.904	0.948	0.076	0.775
8	10.80	176.0	1.0070	1.0021	1.0115	20.870	30.00	2.903	3.445	4.517	1.540	6.056	3.321	1.00630	2.086	0.862	1.218	0.895	0.090	0.782
9	12.95	164.0	1.0048	1.0018	1.0108	20.870	30.00	3.855	2.594	5.567	1.471	7.038	3.483	1.00550	1.826	0.893	0.795	0.911	-0.044	0.892
10	13.90	155.0	1.0047	1.0012	1.0109	20.925	30.00	3.839	2.605	6.131	1.903	8.034	3.662	1.00520	2.093	1.116	0.815	0.855	-0.087	0.874
11	4.35	257.4	1.0049	1.0012	1.0079	20.700	30.00	1.737	5.756	3.907	1.302	5.209	2.148	1.00440	2.999	1.572	0.692	0.738	0.051	0.767
12	13.60	176.2	1.0039	1.0009	1.0095	20.865	30.00	3.982	2.511	6.306	0.000	6.306	3.456	1.00330	1.584	0.602	0.000	1.151	0.104	0.787
13	9.05	176.4	1.0048	1.0007	1.0100	15.840	35.00	2.736	1.827	4.223	0.613	4.841	3.302	1.00480	1.769	0.766	0.417	1.027	-0.023	0.811
14	19.95	139.6	1.0048	1.0003	1.0089	15.010	35.00	4.493	1.113	6.069	1.278	7.346	4.037	1.00430	1.635	0.487	1.134	1.031	0.006	0.781
15	13.05	203.0	1.0054	1.0004	1.0061	15.855	35.00	3.269	1.529	5.127	6.382	11.509	2.825	1.00480	3.521	1.491	12.584	1.214	0.005	0.458
16	4.90	278.0	1.0052	1.0003	1.0059	15.770	35.00	1.713	2.919	2.751	2.116	4.867	2.040	1.00420	2.841	1.026	6.067	1.159	0.058	0.510
17	17.20	158.4	1.0065	1.0003	1.0079	15.940	35.00	3.659	1.366	6.520	4.732	11.252	3.602	1.00540	3.075	1.356	2.712	0.934	-0.084	0.603

付表－3（定常実験成層なし）

No.	ζ	T	q_0	ρ_0	ρ_1	h_c	h_b	u_b	ρ_b	η	q_b	ξ	F_{ib}	L_s
16	2.85	365.0	7.886	1.0064	0.9993	1.995	17.02	2.77	1.00049	8.530	47.10	4.972	0.621	0.294
18	2.85	357.0	8.063	1.0064	0.9986	1.963	19.41	2.83	0.99974	9.890	54.91	5.811	0.607	0.166
34	2.85	361.0	7.974	1.0036	0.9994	2.392	13.23	2.80	1.00030	5.530	37.01	3.642	0.819	0.424
36	2.85	362.0	7.952	1.0035	0.9992	2.369	13.23	2.79	1.00013	5.584	36.91	3.642	0.804	0.427
39	2.85	361.0	7.974	1.0014	0.9995	3.114	10.43	2.80	1.00002	3.349	29.18	2.660	1.215	0.457
40	2.85	356.0	8.086	1.0017	0.9994	2.950	10.43	2.84	1.00003	3.536	29.59	2.660	1.118	0.484
41	2.85	353.0	8.154	1.0017	0.9996	3.058	9.04	2.86	1.00026	2.956	25.87	2.172	1.184	0.542
43	2.85	360.0	7.996	1.0013	0.9996	3.238	11.36	2.81	1.00003	3.509	31.87	2.986	1.283	0.378
44	2.85	360.0	7.996	1.0014	0.9995	3.120	11.36	2.81	0.99998	3.641	31.87	2.986	1.214	0.402
55	2.82	365.0	7.803	1.0025	0.9994	2.608	13.70	2.77	1.00004	5.252	37.91	3.858	0.945	0.360
56	2.82	355.0	8.023	1.0039	0.9997	2.402	14.17	2.85	1.00054	5.898	40.31	4.025	0.833	0.371
1	1.95	340.0	5.793	1.0060	0.9995	1.673	15.59	2.97	1.00031	9.320	46.31	6.995	0.845	0.254
2	1.95	346.0	5.692	1.0060	0.9995	1.653	10.89	2.92	1.00066	6.587	31.79	4.585	0.830	0.512
3	1.95	342.0	5.759	1.0062	0.9993	1.633	14.17	2.95	1.00025	8.675	41.85	6.267	0.813	0.349
7	1.95	359.0	5.486	1.0062	0.9983	1.512	12.76	2.81	0.99951	8.441	35.90	5.544	0.723	0.448
57	1.95	364.0	5.411	1.0038	0.9997	1.862	13.23	2.77	1.00030	7.104	36.71	5.785	0.995	0.338
22	1.95	360.0	5.471	1.0028	0.9983	1.907	8.58	2.81	0.99979	4.499	24.07	3.400	1.025	0.581
23	1.95	362.0	5.441	1.0028	0.9988	1.884	8.58	2.79	0.99971	4.554	23.94	3.400	1.009	0.585
24	1.95	368.0	5.352	1.0036	0.9995	1.849	10.43	2.74	1.00027	5.642	28.63	4.349	0.978	0.497
26	1.95	358.0	5.501	1.0035	0.9995	1.898	11.36	2.82	1.00019	5.984	32.05	4.826	1.018	0.435
54	1.95	357.0	5.517	1.0025	0.9994	2.070	13.70	2.83	0.99984	6.618	38.76	6.026	1.164	0.234
46	1.95	360.0	5.471	1.0017	0.9993	2.241	12.29	2.81	0.99968	5.483	34.48	5.303	1.311	0.267
47	1.95	360.0	5.471	1.0017	0.9992	2.211	8.58	2.81	0.99977	3.881	24.07	3.400	1.281	0.518
48	1.95	353.0	5.579	1.0016	0.9996	2.413	13.23	2.86	0.99989	5.482	37.85	5.785	1.476	0.115

付表－4（定常実験成層なし）

No.	ζ	T	ρ_0	h_1	ρ_2	h_1	h_2	q_0	h_c	h_{b1}	h_{b2}	ρ_b	$H-h_2/h_c$	η	ξ	B	L_s
1	2.85	315.0	1.0053	1.0024	1.0095	16.175	20.000	9.138	2.966	5.30	2.50	1.00522	3.608	2.629	1.398	1.191	-0.036
2	1.95	358.0	1.0055	1.0029	1.0104	16.375	19.600	5.501	2.193	5.20	0.50	1.00511	5.062	2.486	1.567	0.166	-0.026
3	0.95	358.0	1.0058	1.0028	1.0100	15.875	19.600	2.680	1.295	3.10	0.30	1.00505	8.573	2.867	2.130	0.148	0.074
4	2.46	350.0	1.0065	1.0033	1.0096	17.070	19.200	7.099	2.426	5.70	0.90	1.00596	4.740	2.432	1.353	0.306	0.040
5	3.46	355.0	1.0067	1.0029	1.0105	17.230	19.500	9.844	2.849	7.30	2.00	1.00607	3.931	2.496	1.362	0.580	-0.063
7	1.41	360.0	1.0074	1.0023	1.0112	16.905	18.800	3.956	1.407	5.40	1.00	1.00580	8.458	5.498	2.970	0.260	-0.109
8	2.97	352.0	1.0068	1.0012	1.0109	17.685	18.800	8.522	2.274	6.30	1.00	1.00563	5.232	2.402	1.154	0.337	0.091
9	1.46	362.0	1.0069	1.0015	1.0107	16.930	18.800	4.073	1.407	4.80	0.30	1.00513	8.455	3.029	2.056	0.095	0.096
10	2.24	355.0	1.0073	1.0019	1.0100	16.620	19.500	6.373	1.897	5.00	1.30	1.00601	5.904	2.759	1.464	0.524	0.095
11	2.71	365.0	1.0080	1.0018	1.0101	17.555	18.800	7.499	2.020	6.80	1.50	1.00630	5.892	3.104	1.684	0.396	-0.008
12	0.97	350.0	1.0089	1.0019	1.0123	16.285	19.300	2.799	1.006	3.70	0.40	1.00638	11.334	3.383	2.696	0.153	0.091
13	1.01	355.0	1.0086	1.0018	1.0097	11.805	23.700	2.874	1.033	2.50	0.70	1.00670	6.774	2.986	1.814	0.510	0.076
14	1.54	355.0	1.0121	1.0019	1.0114	11.170	24.600	4.381	1.197	4.20	0.90	1.00878	5.095	4.044	1.961	0.359	-0.031
15	1.95	342.0	1.0115	1.0018	1.0113	11.475	24.500	5.759	1.461	4.10	2.00	1.00950	4.245	3.999	1.789	1.027	-0.027
16	2.47	358.0	1.0113	1.0020	1.0117	11.535	24.700	6.968	1.682	4.90	2.50	1.00982	3.567	3.682	1.675	1.146	-0.071
17	1.68	356.0	1.0118	1.0019	1.0123	11.040	24.800	4.766	1.279	3.30	2.20	1.00918	4.613	3.761	1.917	1.528	-0.015
23	1.68	361.0	1.0104	1.0062	1.0099	11.140	24.700	4.700	1.686	3.20	0.20	1.00907	3.560	2.851	0.803	0.150	0.100
25	2.86	379.0	1.0070	1.0061	1.0092	11.830	24.600	7.622	3.883	3.30	0.40	1.00732	1.571	1.207	0.156	3.900	0.083

水工研報告　3
1982　pp. 41～66

MAC法による非定常密度流のシミュレーション

武内　智行*

目　次

1　まえがき……41
2　シミュレーション方法……41
　2.1 基礎方程式……42
　2.2 境界条件……43
　2.3 計算手順……44
　2.4 計算安定条件……47
3　シミュレーション例……49
4　あとがき……50
　参考文献……50
　付録　プログラムソースリスト……50

1　まえがき

近年，沿岸海域開発，環境保全，水資源開発などの問題が高度化するにしたがい，それらの問題に対処するため，各種密度流現象の内部機構解明や水理特性把握の重要性が高まってきている。この様な状況の中で，従来からの理論的・実験的研究を補う手段としてコンピュータシミュレーションを利用する動きが生れている。MAC法（Marker-and-Cell method）の非定常密度流解析への応用もその一つである。

周知の如く急変流や非定常流の解明にあたってはその内部構造の把握とそれに基く内部機構の解明が不可欠である。

流体力学の運動方程式と連続の式とを直接差分近似するMAC法を用いれば，速度分布・圧力分布等の内部状態のみならず水面形の時間変化をも容易に知ることができる。現在，MAC法は種々の展開改良がなされている段階にあり，計算から得られた結果の妥当性を認めるには，今のところ実験値や理論値の援用を必要とする場合が少なくない。しかし，計算から求められる内部状態等に関する情報は，今後の理論的・実験的・数値的研究上の参考資料として重要な意義をもつものと考えられる。

もちろん，シミュレーション結果だけでは流れの予測のための情報としては不十分な点も多いであろう。しかし，MAC法による結果は測定だけから推定し得る以上の情報（特に流れの内部状態に関する情報）をも合わせ含んでいることに留意しておきたい。

MAC法を非定常密度流シミュレーションに応用した例としては，Daly[1]のRayleigh-Taylor Instabilityに関する研究，Daly & Pracht[2]のDensity Current Surgeに関する研究，Slottaら[3]の成層流体からの選択取水等に関する研究，Young & Hirt[4]の連続成層流体中への均質流塊の拡がりに関する研究，和田ら[5]の温排水の拡散予測に関する研究，武内[6]のDensimetric Exchange Flowに関する研究などが挙げられよう。これらのうち，自由表面の時間的変化をも考慮したのはDaly & Pracht, Slottaら，および武内である。

本報告では，著者が文献6)にて発表した手法のより詳しい解説を行ない，あわせて若干のシミュレーション例を示すことにする。

2　シミュレーション手法

本章では，MAC法の概略を述べてから，計算手順等について述べる。

最初のMAC法（Marker-and-Cell method）は粘性をもつ二次元非圧縮性非定常自由表面流の数値解析法として発表された[7]。その概念は次のようなものである。

変幻自在な自由表面の位置を常にとらえておくためには，流体中に標識としてのマーカー（marker particle）をおき，流体部分とそうでない部分とを常に判別し得るようにすればよい。すなわち，計算開始時$T=t_0$に流体部分の各セル（MAC法では一つ一つの差分格子をセルという）にマーカーを配置しておき，以後速度場にのせてマーカーを刻々と移動させながら，各時間ステップごとに，流体部分とそうでない部分（マーカーを含むセルと含まないセル）との判別を行う。通常，二次元非圧縮性流の計算では，従属変数として流速成分u, vと圧力pの代わりに流れ関数Ψと渦度ωを用い，変数の数を一つ減らす。しかし，MAC法ではマーカーを移動させるのにその位置での流速を知

---

* 水産土木工学部

る必要があり，かつ自由表面での圧力条件を満足させる必要上，流体運動の基礎方程式（Navier-Stokes の運動方程式，連続の式）を直接差分して用いる。流速・圧力などの変数値は流体部分の各セルについて求めればよい。なお，マーカーは速度場・圧力場などの計算には直接関与しないが，計算結果の視覚化，言うなれば流れの可視化に重要な役割をもつ。

さらに，この考え方は内部境界面をもつ密度流にも応用できる。すなわち，2種類のマーカーを用いて内部境界面を表わすことができる。この場合，マーカーは各セルの密度計算に用いられる。

MAC 法は1965年に発表されて以来，漸次展開改良がなされてきている[8,9]。たとえば，次のようなものが発表されている。

SUMMAC法[10]は特に水面位置を精確にとらえるための高次近似を取り入れた手法で，孤立波の伝播に関する問題に適用された。

NUMAC法[3]は成層した貯水池への濁流流入問題等に応用された。

SMAC法[11]は最初のMAC法の境界条件の繁雑さを緩和（特に圧力に関する収束計算の部分を改良）し演算時間が著しく改善された手法である。SMAC法はMAC法のその後の発展に大きな影響を与えた。著者はSMAC法の基本アルゴリズムを応用し，表面条件等の取扱いに改良を加えて自由表面をもつ急変不定流解析に応用し良好な結果を得た[12]。

ABMAC法[13]は自由表面の取扱い方を固定壁面まで拡張して任意の外部形状をもつ流れへの適用を可能とした方法である。また，圧力を求める収束計算の過程に圧力・流速同時緩和法が導入された。

SOLA[14]はABMAC法の特徴を有しながらも，比較的安定した自由水面をもつ流れを扱うことを前提にして計算の簡易化をはかっている。

著者は，当初の MAC 法のもつ欠点とその後の展開改良を考慮した上で，MAC法を自由表面および内部境界面をもつ二流体密度流のシミュレーション手法にまで拡張し，その手法を用いてDensimetric Exchange Flowを一例として先端部をもつ非定常密度流の解析を行った。

以下，著者が文献6）にて用いたシミュレーション手法について概説する。

2.1　基礎方程式

温度変化，乱れ，表面張力などの効果は無視し，流れは二次元非圧縮性とする。また，拡散はここでは考えない。下記の（1）～（3）式を基礎方程式として用いる。

$$D=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} =\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right\} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} =\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left(2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right\} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

ρ:密度，p:圧力，μ:粘性係数，g_x, g_y: x, y 方向外力成分，u, v: x, y 方向流速成分。

（1）式は質量保存の式（連続の式）であるが，非圧縮性の条件を用いて簡単化されている。すなわち，一般に質量保存の式は，

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\mathbf{V})=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(a)}$$

であるが（$\mathbf{V}$：流速ベクトル），物質微分D/Dtを用いて次のようにも表わされる。

$$\frac{D\rho}{Dt}+\rho\ \mathrm{div}\ \mathbf{V}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(a')}$$

ところで，非圧縮性流体では運動中流体素片の密度は一定に保たれるから，

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(b)}$$

が成立する。したがって(a)式は簡単化されて，

$$\mathrm{div}\mathbf{V}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(c)}$$

となる[15]。これを成分で示したのが（1）式である。

（2），（3）式はそれぞれx, y方向の運動方程式を（1）式を用いて変形した式である。

なお，（1）～（3）式により速度場・圧力場を求めることができるが，密度場は(a)式又は(b)式によらねばならない。しかし，ここでは拡散を考慮しない二流体非定常密度流を対象としたため，密度は各セル中の二種のマーカーの個数の重み付き平均値として算出した*。すなわち，あるセルに密度 ρ_1, ρ_2 の流体のマーカーがそれぞれ n_1，n_2 個含まれているとき，そのセルの密度 ρ は，

$$\rho=\frac{\rho_1 n_1+\rho_2 n_2}{n_1+n_2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

で与えられる（図 1）。

また，水位 h を変数として導入し，水位変化は次式で求めた。

---

* 密度変化はマーカーの移動によって表現される。（4）式は（b）式の内容を含んでいる。

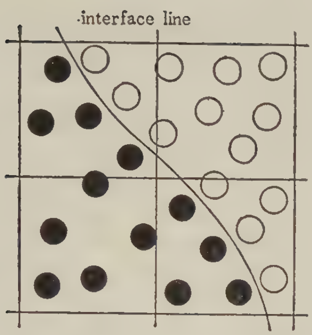


図 1　2種のマーカーと内部界面
Two kinds of marker particles and the interface

$$\frac{\partial h}{\partial t}+u\frac{\partial h}{\partial x}=v \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

ここで，h は x 座標に対して一価でなければならないから，本式の導入により，自由表面の変動に対して適用範囲がその条件の成立範囲内に限定されていることに注意されたい*。ただし，自由表面の変動が比較的少ない本報告例の場合には，本式の導入はきわめて有効であった。

（5）式は次のように誘導される[16]。一般に変形境界面の形が $F(x,y;t)=0$ で与えられるとき，その境界面における運動学的条件は $DF/Dt=0$ である。水表面は，

$$y=h(x;t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{d})$$

で与えられるから，上式を陰関数表示して

$$F(x,\ y;t)=h(x;t)-y=0 \cdots\cdots\cdots\cdots(\mathrm{e})$$

となる。これを $DF/Dt=0$ に代入して（5）式を得る。

2.2　境界条件

(1)　壁面における境界条件（**図 2**）

①　壁面が非粘着性あるいは滑面の場合は**Freeslip**条件を用いる。すなわち，法線方向の流速は壁面において0，接線方向の流速は壁面にてコウ配をもたない

$$u_{i-\frac{1}{2},\ j}=0;\ v_{i-1,j+\frac{1}{2}}=v_{i,\ j+\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

②　壁面が粘着性あるいは粗面の場合は Noslip 条件を用いる。すなわち，法線方向・接線方向の流速とも壁面にて0。

$$u_{i-\frac{1}{2},\ j}=0;\ v_{i-1,j+\frac{1}{2}}=-v_{i,j+\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6')$$

(2)　自由表面における境界条件

非圧縮性粘性流体の自由表面において，ストレステンソル σ_{ik} は次の条件式を満足する[17]，

$$\sigma_{ik}\mathbf{n}_k=\sigma'_{ik}\mathbf{n}_k-p_{ni}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここに，σ'_{ik}：粘性ストレステンソル，$\mathbf{n}_k$：x_k方向単位

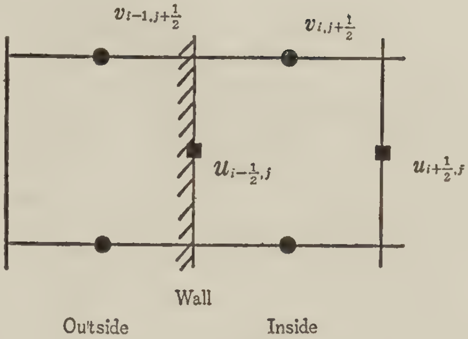


図 2　壁面境界
Position of variables at a left wall

ベクトル，p_{ni}：x_i 方向法線圧力。この式を$x-y$座標系にて法線方向成分と接線方向成分とに分けるとそれぞれ（8），（9）式になる。

$$p-2\nu\left\{n_xn_x\frac{\partial u}{\partial x}+n_xn_y\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+n_yn_y\frac{\partial v}{\partial y}\right\}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

$$\nu\left\{2n_xm_x\frac{\partial u}{\partial x}+(n_xm_y+n_ym_x)\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+2n_ym_y\frac{\partial v}{\partial y}\right\}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

ここに，n_x, n_y: 法線方向単位ベクトルのx, y 方向成分 m_x, m_y: 接線方向単位ベクトルの x, y 方向成分，ν：動粘性係数

水面コウ配 θ がわかれば（8）式から自由表面における圧力 p_s を求めることができる。

自由表面における流速は連続の式から求める。この場合，流速については計算の都合上 θ は45°刻み*で近似せざるを得ない。

なお，SUR セルが隣合せに並んだ場合，すぐ外側の

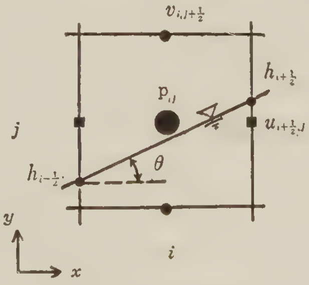


図 3　自由表面境界
Position of variables at a free surface

---

*　任意の自由表面形状を扱いたい場合には，従来通りマーカーによって自由表面を識別すればよい。

*　これは $\delta x=\delta y$ の正方形セルの場合である。一般の長方形セルの場合は$\alpha=\tan^{-1}(\delta y/\delta x)$を用いてこの角度を表現すべきである。

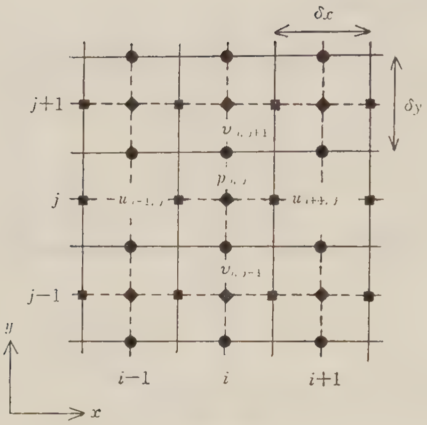

δx
δy
j+1
j
j−1
$v_{i,j+\frac{1}{2}}$
$p_{i,j}$
$u_{i-\frac{1}{2},j}$
$u_{i+\frac{1}{2},j}$
$v_{i,j-\frac{1}{2}}$
i−1
i
i+1
y
x

図 4　変数配置
The location of the cell variables

EMPセルでの流速値（u又はv）が計算上必要となる。その値は(9)式から求められる。

2.3　計算手順

基礎方程式および境界条件式等を差分表示して解くことになるが，その際$\delta x\times\delta y$の長方形セルの格子網を考え，変数配置は図4のようにする（流速以外の変数はセル中央に配置する）。

計算の概略の流れを図5に示す。

以下，図の流れに従って計算手順の概略を説明する。（各項目の番号は図中の番号に対応させてある。）

(1)　初期セット

初期条件（初期流体領域，初期流速，マーカー初期位置等）の設定，境界条件等に関するパラメータ値の入力をする。

(2)　密　度

各セルに含まれている2種のマーカーの個数をカウントし，(4)式に従って各セルの密度を求める。

(3)　流体領域識別

各時間ステップにおいて計算の対象となるのは流体を含むセルである。流体を含むセルとそうでないセルとの判別を行う際，各セルに標識（MAC法ではフラッグという）を付けておくと計算上の取扱いが容易となる。

各セルは次の5通りに分類される。

OB　：Obstacle Cell（障害物セル）
EMP：Empty Cell（空のセル）
SUR：Surface Cell（自由表面セル）
FUL：Full Cell（流体で満たされたセル）

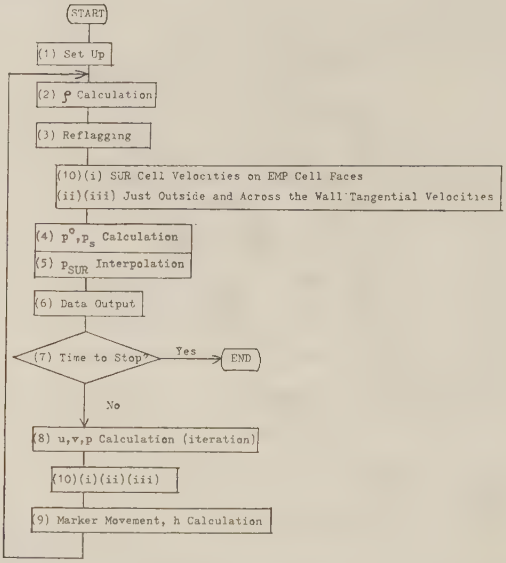
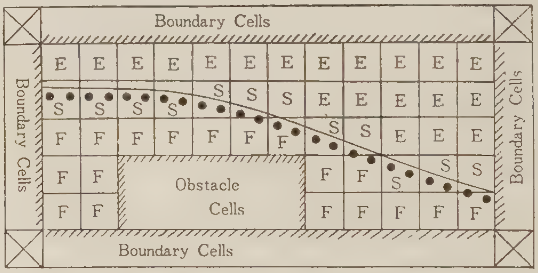

START
(1) Set Up
(2) ρ Calculation
(3) Reflagging
(10)(i) SUR Cell Velocities on EMP Cell Faces
(ii)(iii) Just Outside and Across the Wall Tangential Velocities
(4) p°,p$_s$ Calculation
(5) P$_{SUR}$ Interpolation
(6) Data Output
(7) Time to Stop?
Yes
END
No
(8) u,v,p Calculation (iteration)
(10)(i)(ii)(iii)
(9) Marker Movement, h Calculation

図 5　計算の流れ
The calculational cycle


Boundary Cells
Boundary Cells
Boundary Cells
Boundary Cells
E
S
F
Obstacle Cells

F:Full Cell, S:Surface Cell, E:Empty Cell

図 6　領域識別
A computing mesh, cell flags

BND：Boundary Cell（境界セル）

流体で満たされたFULセル，流体を含みかつ一つ以上のEMPセルと接しているSURセル，および流体を全く含まないEMPセルの3種のセルは自由表面の変化に応じてフラッグの変化する可能性をもつ。すなわち，EMPセルがSURセルになったり，SURセルがFULセルになったり，あるいはその逆の変化があり得る。これらに対し，OBセルとBNDセルは常に定まったフラッグをもつ。

ここでの仕事は，セルフラッグの変化を判定し，次の時間ステップにおける計算対象領域を確定することである。計算対象領域となるのは流体を含むセル，すなわちFULセルとSURセルである。なお，本手法では，水位を変数として導入したため，SURセルの識別はマーカ

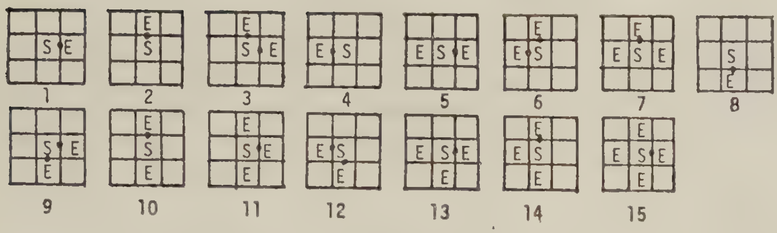


図 7　SURセルとEMPセルとの可能な配置
The 15 possible arrangements of EMP cell(s) about a SUR cell

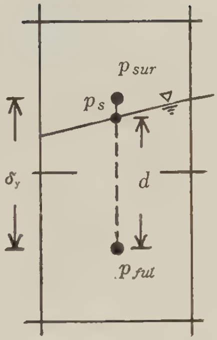


図 8　SURセルの圧力補間
Surface cell pressure interpolation

ーによらず，セルの中心線（y 軸方向）と水面とが交わる点が存在するセルをSUR セルとしている。

(4)　仮圧力・表面圧力

ここでいう仮圧力とは新圧力（次の時間ステップでの圧力）を求める際の第0次近似値である。仮圧力にはこの時間ステップでの圧力を用いればよい。ただし，最初の時間ステップではあらかじめ与えねばならない。ある基準高さy_0をとり，そこを基準として水深方向に静水圧的分布を与えることにした。

$$p^0=\rho g(y-y_0) \quad \cdots\cdots(10)$$

（仮圧力には任意の値を用いてもよいが，（7）項における反復計算の収束性に影響する。）

自由表面における圧力は（8）式から求められる。水面コウ配θは水位hを用いて容易に算出される（図 3)。SMAC法などでは水面コウ配を45°*刻みで近似していたが，本手法では±45°*以内の任意の傾きを扱っている。SUR セルとEMP セルとの位置関係としては一般的に**Fig.** 7に示す15通りが考えられる。しかし，本手法では水位hの導入によりそのうち2，3，6，7の4通りのみ考慮すればよい。その各々の場合について（8）式より表面圧力p_sを求める差分式は下記のようになる（他の場合も同様)。（ここで，$\sin\theta=-n_x$, $\cos\theta=n_y$）

〔2〕の場合

$$\begin{aligned}p_s=2\rho\mu\Big\{&\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac12,j}-u_{i-\frac12,j}}{\delta x}\\&+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac12}-v_{i,j-\frac12}}{\delta y}\\&-\sin\theta\cos\theta\Big(\frac{v_{i+1,j+\frac12}-v_{i-1,j+\frac12}}{2\delta x}\\&+\frac{u_{i+\frac12,j}-u_{i+\frac12,j+1}+u_{i-\frac12,j}-u_{i-\frac12,j-1}}{2\delta y}\Big)\Big\}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(11)_1$$

〔3〕の場合

$$\begin{aligned}p_s=2\rho\mu\Big\{&\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac12,j}-u_{i-\frac12,j}}{\delta x}\\&+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac12}-v_{i,j-\frac12}}{\delta y}\\&-\sin\theta\cos\theta\Big(\frac{v_{i,j+\frac12}-v_{i-1,j+\frac12}}{\delta x}\\&+\frac{u_{i+\frac12,j}-u_{i+\frac12,j-1}}{\delta y}\Big)\Big\}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(11)_2$$

〔6〕の場合

$$\begin{aligned}p_s=2\rho\mu\Big\{&\sin^2\theta\frac{u_{i+\frac12,j}-u_{i-\frac12,j}}{\delta x}\\&+\cos^2\theta\frac{v_{i,j+\frac12}-v_{i,j-\frac12}}{\delta y}\\&-\sin\theta\cos\theta\Big(\frac{v_{i+1,j+\frac12}-v_{i,j+\frac12}}{\delta x}\\&+\frac{u_{i-\frac12,j}-u_{i-\frac12,j-1}}{\delta y}\Big)\Big\}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(11)_3$$

〔7〕の場合

$$p_s=0.0 \quad \cdots\cdots(11)_4$$

(5)　表面セル圧力補間

圧力は変数としてセル中央に配置されている。したがって，表面セルの圧力 p_{SUR} と前項で求めた自由表面での圧力p_sとは必ずしも一致しない。計算上用いるのは表面セルでの圧力である。次式の直線補間によって表面セルでの圧力を求める（図 8)

$$p_{SUR}=\eta p_s+(1-\eta)p_{FUL} \quad \cdots\cdots(12)$$

（ただし，$\eta=\delta y/d$）

(6)　出力処理

適当な時間ステップ間隔で計算結果（流れの様子）を出力する。

(7)　時間処理

計算を終了すべき時間ステップに達していたら計算を終了させる。そうでなければ，時間ステップを1つ進める。

---

*　前脚注

(8)　新流速・新圧力

運動方程式(2)，(3)式の差分表示として本手法では(13)〜(16)式を用いた。(13)，(14)，(16) 式は Welchら7)，(15)式はYoungら4)によるものである。(右辺において，時間ステップの添字 n を省略している。)

$$(\rho u)^{n+1}_{i+\frac{1}{2},j}=(\rho u)_{i+\frac{1}{2},j}+\delta t\Big[\frac{(\rho u^2)_{i,j}-(\rho u^2)_{i+1,j}}{\delta x}$$

$$+\frac{(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}-(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta y}$$

$$+2\frac{\mu_{i+1,j}(u_{i+\frac{3}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j})-\mu_{i,j}(u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j})}{\delta x^2}$$

$$+\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta y}\Big(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}}{\delta y}$$

$$+\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\Big)-\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},j\frac{1}{2}}}{\delta y}\cdot$$

$$\Big(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i+\frac{1}{2},j-1}}{\delta y}+\frac{v_{i+1,j-\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta x}\Big)$$

$$+\rho_{i+\frac{1}{2},j}g_x+\frac{p_{i,j}-p_{i+1,j}}{\delta x}\Big]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

$$(\rho v)^{n+1}_{i,j+\frac{1}{2}}=(\rho v)_{i,j+\frac{1}{2}}+\delta t\cdot$$

$$\Big[\frac{(\rho uv)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}-(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta x}$$

$$+\frac{(\rho v^2)_{i,j}-(\rho v^2)_{i,j+1}}{\delta y}$$

$$+2\frac{\mu_{i,j+1}(v_{i,j\frac{3}{2}+}-v_{i,j+\frac{1}{2}})-\mu_{i,j}(v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}})}{\delta y^2}$$

$$+\frac{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\Big(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}-u_{i+\frac{1}{2},j}}{\delta y}$$

$$+\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\Big)-\frac{\mu_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\cdot$$

$$\Big(\frac{u_{i-\frac{1}{2},j+1}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta y}+\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i-1,j+\frac{1}{2}}}{\delta x}\Big)$$

$$+\rho_{i,j+\frac{1}{2}}g_y+\frac{p_{i,j}-p_{i,j+1}}{\delta x}\Big]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

ただし，

$$\left.\begin{array}{l}(\rho u^2)_{i,j}=\rho_{i,j}\ u_{i+\frac{1}{2},j}\ u_{i-\frac{1}{2},j}\\(\rho v^2)_{i,j}=\rho_{i.j}\ v_{i,j+\frac{1}{2}}\ v_{i,j-\frac{1}{2}}\end{array}\right\}(15)$$

$$(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}=\frac{\rho_{i,j-1}+\rho_{i+1,j-1}}{2}$$

$$\cdot u_{i+\frac{1}{2},j-1}\cdot\frac{v_{i,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}}{2}$$

$$if\ \frac{v_{i,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}}{2}\geqq 0$$

$$(\rho uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}=\frac{\rho_{i,j}+\rho_{i+1,j}}{2}\qquad(16)$$

$$\cdot u_{i+\frac{1}{2},j}\cdot\frac{v_{i,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}}{2}$$

$$if\ \frac{v_{i,j-\frac{1}{2}}+v_{i+1,j-\frac{1}{2}}}{2}<0$$

(13)，(14)式から求められる新流速 u^{n+1}, v^{n+1} は一般に連続の式を満たしていない。なぜなら，右辺における圧力 p が仮圧力であるからである。したがって，連続の式を満たすように何らかの補正をしつつ，新流速・新圧力を求めねばならない。ここでは，Viecelli が導いた圧力・流速同時緩和法18),19) を用いることにする。

連続の式を満たさないことに対する補正として圧力の第 l 回反復値を次式で求める。

$$\overset{l}{p}_{i,j}=\overset{l-1}{p}_{i,j}+\delta p_{i,j}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

ここに，$\delta p_{i,j}$ は本来0となるべき連続の式の未満足分 $D_{i,j}$ に比例するようにとる。

$$\delta p_{i,j}=-\beta D_{i,j}=-\beta\Big(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}-u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x}$$

$$+\frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}-v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y}\Big)$$

$$\beta=\frac{\beta_0}{2\delta t}\Big/\Big(\frac{1}{\delta x^2}+\frac{1}{\delta y^2}\Big)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

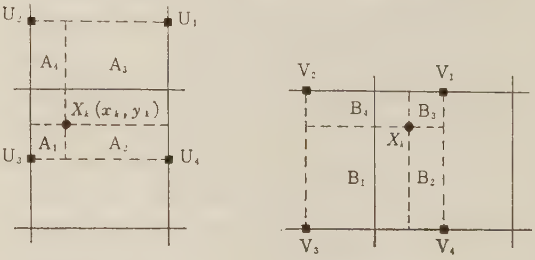
こに，β_0は緩和係数 (relaxation parameter) で1.7〜1.9程度が最適とされる。

さて，(13)，(14)式の中で，時間ステップ n において既知の項をまとめて ξ と ζ とで表現すれば，

$$(\rho u)^{n+1}_{i+\frac{1}{2},j}=\xi_{i+\frac{1}{2},j}+\frac{\delta t}{\delta x}(p_{i,j}-p_{i+1,j})\cdots(13)'$$

$$(\rho v)^{n+1}_{i,j+\frac{1}{2}}=\zeta_{i,j+\frac{1}{2}}+\frac{\delta t}{\delta y}(p_{i,j}-p_{i,j+1})\cdots(14)'$$

を得る。右辺の圧力 p の第0次近似値として前述の仮圧力（前項(4)）を用いれば，これより新流速 u^{n+1}, v^{n+1} の第1回目の近似値が決まる。この u, v を(18)式に代入すると (17) 式から p の第1回目 の近似値が決まる。この p を(13)'，(14)'に代入して u, v の第2回目の近似値が求まる。以下同様にして u^{n+1}, v^{n+1}, p を同時に収束させていく方法がViecelli の提案した同時緩和法である。



(a) u_k　　(b) v_k

図 9　マーカー移動

Area-velocity weighting scheme for u_k and v_k, with particle x_k, shown for each if the four quadrants of cell

この方法の中で，pを(13)'，(14)'に代入してu，vの次の近似値を得る手順は，(18) 式で求められるδpを用いてu，vを次のように修正することと同じである。(複号同順，右上肩の添字はここでは反復回数を示す。)

$$\left.\begin{aligned} u^{l+1}_{i\pm\frac{1}{2},j} &= u^{l}_{i\pm\frac{1}{2},j} \pm \frac{\delta t}{\delta x}\delta p_{i,j} \\ v^{l+1}_{i,j\pm\frac{1}{2}} &= v^{l}_{i,j\pm\frac{1}{2}} \pm \frac{\delta t}{\delta y}\delta p_{i,j} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

本手法では，(17)〜(19)式の手順を速度ダイヴァージェンスDがある収束定数εより小さくなるまで繰り返す方法をとった。

(９)　マーカー移動・水位変化

マーカーX_kの移動速度u_k, v_kはX_kに最も近い四つの流速点における流速の加重平均とする（図 9）

$$\left.\begin{aligned} u_k &= \frac{A_1U_1+A_2U_2+A_3U_3+A_4U_4}{\delta x\cdot\delta y} \\ v_k &= \frac{B_1V_1+B_2V_2+B_3V_3+B_4V_4}{\delta x\cdot\delta y} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(20)$$

したがって，マーカーX_kの現在の座標値を (x_k, y_k) とすれば，δt 時間後のX_kの座標値 ($x^{n}{}_k{}^{+1}$, $y^{n+1}{}_k$) は

$$x^{n+1}_{k} = x_k + u_k\cdot\delta t \;\; ; \;\; y^{n+1}_{k} = y_k + v_k\cdot\delta t \;\cdots(21)$$

で与えられる。

また，水位変化は(５)式を差分近似した(22)式で求める。

$$h^{n+1}_{i} = h_i + \delta t\left(v_h - u_h\frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2\delta x}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

ここに，u_h, v_h はh_iにおける流速成分で(20) 式と同様にして求められる。

(10)　自由表面および固定壁面での流速処理

(1)　EMPセルに面したSURセルの流速

SURセルの流速のうちEMPセルに面していないものは基礎方程式から求められる。しかし，EMPセルに面した流速点（図７の黒丸）ではそれができないので，少なくとも連続の式を満たすように算出する。

前述（前項(４)）のようにSURセルとEMPセルとの位置関係は図７に示す15通りが考えられるが，本手法のように自由表面の変動が少ないと仮定し水位hを変数として導入した場合は，そのうち２，３，６，７の４通りに限られる。

〔２〕又は〔７〕の場合は(23)式，〔３〕の場合は(24)式と(25)式，〔６〕の場合は(25)式と(26)式を用いる。他の場合も同様である。

$$v_{i,j+\frac{1}{2}} = v_{i,j-\frac{1}{2}} - \frac{\delta y}{\delta x}\left(u_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j}\right) \cdots(23)$$

$$u_{i+\frac{1}{2},j} = u_{i-\frac{1}{2},j} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

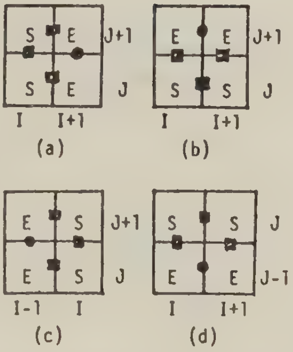


図 10　表面での接線流速を求めるときのセル配置
Free-surface orientations considered in satisfying the tangential stress condition

$$u_{i-\frac{1}{2},j} = u_{i+\frac{1}{2},j} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

$$v_{i,j-\frac{1}{2}} = v_{i,j-\frac{1}{2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$

(ii)　SURセルに隣り合ったEMPセルの流速処理

SURセルが２つ以上連続して並んだ場合には，計算の都合上そのすぐ外側の接線流速を算定しておく必要がある。これは，自由表面における接線方向の応力条件式(９)から求められる。図10に示す４通りのうち (b) について考えてみる。他の場合も同様である)。

(９)式より

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{2}{n_x m_y + n_y m_x}\left(n_x m_x\frac{\partial u}{\partial x} + n_y m_y\frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial v}{\partial x},$$

であるが，水面コウ配をθとすると$n_x = -m_y = -\sin\theta$, $n_y = m_x = \cos\theta$ であるから，

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{2\sin\theta\,\cos\theta}{\cos^2\theta - \sin^2\theta}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial v}{\partial x}$$

となる。この式を差分近似して，

$$\begin{aligned} u_{i+\frac{1}{2},j+1} = u_{i+\frac{1}{2},j} + \frac{2\delta y\sin\theta\cos\theta}{\cos^2\theta - \sin^2\theta}\Bigg(& \frac{u_{i+\frac{3}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j}}{2\delta x} \\ & - \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}} + v_{i+1,j+\frac{1}{2}} - v_{i+1,j-\frac{1}{2}}}{2\delta y}\Bigg) \\ & - \frac{\delta y}{\delta x}\left(v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i-1,j+\frac{1}{2}}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots(27) \end{aligned}$$

を得る。

2.4　計算安定条件

差分格子網を用いる場合の周知の安定条件

$$u_{max}\cdot\delta t < \delta x$$

は必ず満たさねばならない。

Hirt[20] はMAC法における安定条件としてさらに次の２条件を示している。

$$\nu > \frac{1}{2}u_{max}{}^2\cdot\delta t \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$\nu > \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{max}\cdot\delta x^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

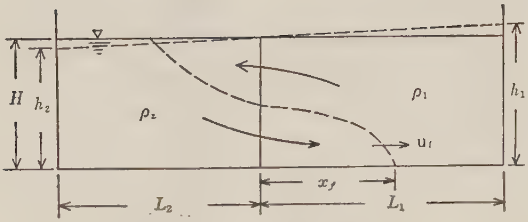
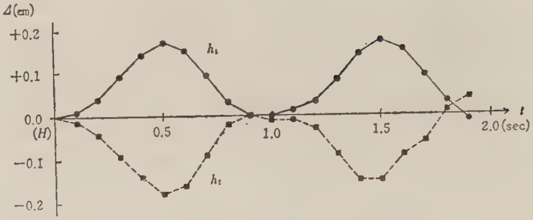
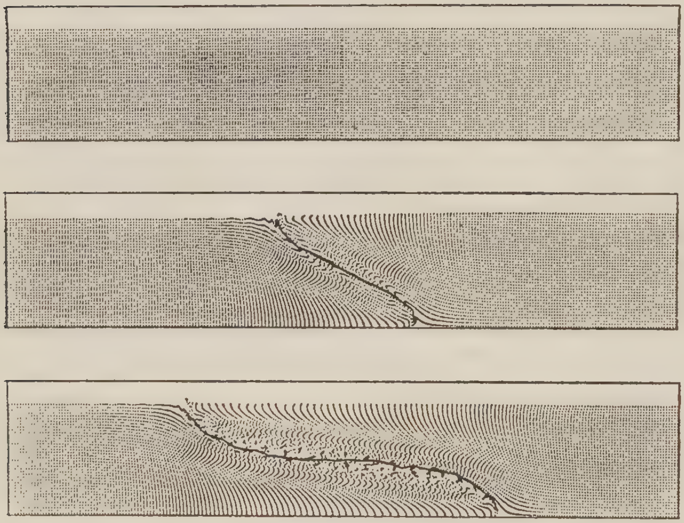


図 11　流れの概略と記号
Outline of this flow



Water level at side walls
（$H=10$ cm, $L_1=L_2=15$ cm, $\rho_1=1.00$, $\rho_2=1.03$）

図 15　水路両端での水位変化
Water level at side walls



Densimetric exchange flow
($t=0.0$, 1.0, 2.0 sec; $\delta t=0.01$ sec, $\delta x=\delta y=1$ cm, $H=10$ cm, $L_1=L_2=30$ cm, $\rho_1=1.00$, $\rho_2=1.03$ g/cm^3, $g_x=0.0$, $g_y=-980.0$ cm/sec^2, $\mu=1.0$ g/cm·sec)

図 12　開放交換流れ
Densimetric exchange flow

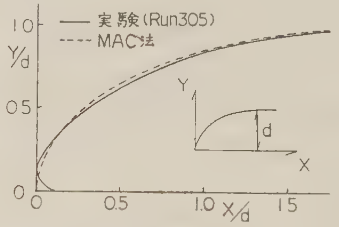


図 13　先端部形状
Shape of the head

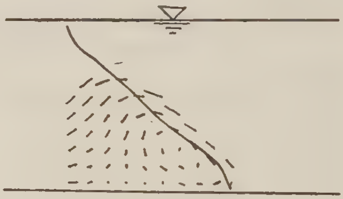


図 16　先端部の渦
Vortex in front region

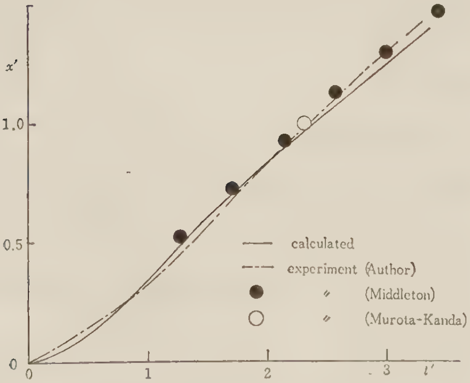


図 14　先端部移動距離
Front position versus time

(29)，(30) 式はそれぞれ線型安定性，非線型安定性に対応する。ただし，彼はこの2条件は"a useful rule of thumb"であるとしている。レイノルズ数の大きな流れになるとこれらの条件を満たすことは計算の経済上容易ではない。実際，彼の計算例は必ずしもこの2条件を満たしていない。局所的に条件を満たさない領域が存在しても，その範囲がごく限られたものであれば計算結果の大勢に影響はないようである。しかし，厳密な議論を特に必要とするような場合には，これらの条件を満足させておくべきであろう。

なお，自由表面における境界条件の与え方も計算安定性に重要な役割をもつものと考えられる。自由表面での境界条件の入れ方等の改良が行われてきているのは，その物理的・数学的精密化に加えて，計算安定性を増すためでもある。

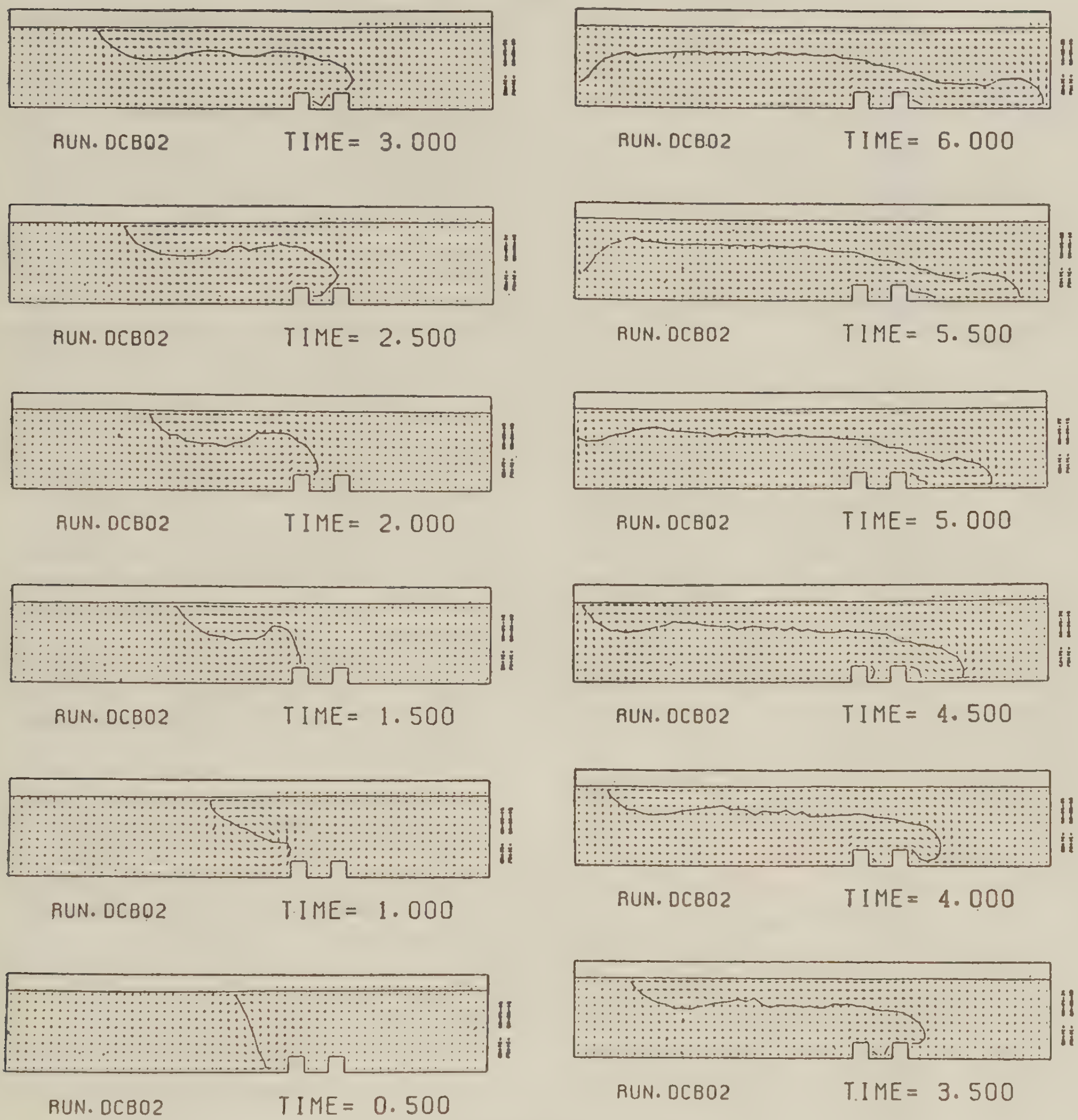

RUN. DCB02　TIME= 3.000
RUN. DCB02　TIME= 2.500
RUN. DCB02　TIME= 2.000
RUN. DCB02　TIME= 1.500
RUN. DCB02　TIME= 1.000
RUN. DCB02　TIME= 0.500
RUN. DCB02　TIME= 6.000
RUN. DCB02　TIME= 5.500
RUN. DCB02　TIME= 5.000
RUN. DCB02　TIME= 4.500
RUN. DCB02　TIME= 4.000
RUN. DCB02　TIME= 3.500

図 17　障害物を越える下層流
Density flow going over two obstacles

3　シミュレーション例

3.1　Densimetric Exchange Flow

この流れは開放交換流れとも呼ばれ,Density Current の一つの典型例である。隔板の両側に各々密度の異なる流体を貯留しておいて瞬間的に隔板を引き抜いた時の流れである（図11)。

図12に流れの様子（シミュレーション例）を示す。図13は下層流先端部の無次元形状，図14にその移動距離の時間変化を示す。シミュレーション結果と実験結果とはきわめて良好な一致を示しており，本シミュレーション手法の有効性が認められよう。

図15は水路両端での水位の時間変化を示したもので，表面波の発生・反射等の影響をとらえているものと考えられる。定量的には明らかでないが，実験においてもほぼ周期的な水位変動が認められている[21]。

図16は下層流先端部の移動速度で動く座標系から見た速度ベクトルの一例である。先端部の渦が明瞭に認められる。しかし，渦の間欠的放出は三次元性の強い現象と考えられ，二次元的な本シミュレーションではシミュレートされていない。

図12における内部境界面付近のマーカー配列の乱れは，差分格子間隔の影響も考えられるが，実際の混合現象との関連も考えられる。この点については今後の課題である。

3.2　障害物を越える下層流

図17は Densimetric Exchange Flow において下流側に障害物を置いた場合の流れの様子（速度ベクトル図）である。障害物の背後に軽い方の流体がとり残されるのがわかる。

4　あとがき

以上，本報告では MAC 法による非定常密度流のシミュレーション方法とその例について述べ，本手法の有用性を示した。MAC 法を密度流に応用した例は未だ数少なく，今後の進展が期待される。

なお，本報告で述べた手法は，拡散・温度変化・乱れ・表面張力等の効果を無視し，二次元非圧縮性二流体密度流を対象としたもので，水面変動が比較的少ないことを仮定していることに留意されたい。乱れ・温度変化等を考慮した場合や三次元流等のシミュレーション手法については今後の開発課題としたい。

付録に示すプログラムのソースリストは著者が改良修正中のものであるので，使用される場合は著者に連絡されることを希望する。

参考文献

1) Daly, B. J.: Numerical Study of Two Fluid Rayleigh-Taylor Instability, Phys. Fluids, 10(2), 297—307 (1967)

2) Daly, B. J. and W. E. Pracht: Numerical Study of Density-Current Surges, Phys. Fluids, 11(1), 15—30 (1968)

3) Slotta, L. S. et al: Stratified Reservoir Currents, Oregon State University, Bulletin No. 44 (1969)

4) Young, J. A. and C. W. Hirt: Numerical Calculation of Internal Wave Motions, J. Fluid Mech., 56, 265—276 (1972)

5) 和田明ら：海水淡水化にともなう排出ブラインの拡散予測，第22回水理講演会論文集，75—80（1978）

6) 武内智行：自由水面をもつ Densimetric Exchange Flow のシミュレーション—MAC法による不定流解析（Ⅱ），農業土木学会論文集，No.88，27—32（1980）

7) Welch, J.E., F. H. Harlow, J. P. Shannon and B. J. Daly: The MAC Method, Los Alamos Scientific Laboratry, LA-3425 (1966)

8) 鳥井清司：MAC 法による自由表面をもつ流れの数値解析，日本機械学会関西支部第36回特別講義会テキスト，57—80（1979）

9) 武本行正ら：非圧縮性粘性流体の数値解法プログラム（その1），京都大学大型計算機センター広報，13，453—461（1980）

10) Chan, R.K.C. and R.L. Street: A Computer Study of Finite Amplitude Water Waves, J. Comp. Phys., 6, 68—94 (1970)

11) Amsden, A. A. and F. H. Harlow: The SMAC Method, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-4370 (1970)

12) 武内智行：自由水面をもつ急変不定流の数値解析に関する研究，東京大学修士論文（1976）または農業土木学会論文集，No.87，45—53（1980）

13) Garcia Jr., W. J. and J. A. Viecelli: ABMAC—Arbitrary Boundary Marker and Cell Eulerian Hydrodynamic Incompressible Numerical Method, Lawrence Livermore Laboratory (1976)

14) Hirt, C.W., B. D. Nichols and N.C. Romero: SOLA: A Numerical Scientific Algorithm for Transient Fluid Flow, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-5852 (1975)

15) 今井功：流体力学（前編），裳華房，20—22（1973）

16) 椿東一郎：水理学Ⅰ，森北出版，41—42（1973）

17) ランダウ・リフシッツ：流体力学1，東京図書，50（1970）

18) Viecelli, J. A.: A Computing Method for Incompressible Flows Bounbed by Moving Walls, J. Comp. Phys., 8, 119—143 (1971)

19) Hirt, C. W. anb J. L. Cook: Calculating Three Dimensional Flows Around Structures and Over Rough Terrain, J. Comp. Phys., 10, 324—340 (1972)

20) Hirt, C. W.: Heuristic Stability Theory for Finite Difference Equations, J. Comp. Phys., 2, 339—355 (1968)

21) Barr, D.I.H.: Densimetric Exchange Flow in Rectangular Channels, Ⅲ. Large scale experiments, La Hoille Blanche, No. 6, 619—632 (1967)

付録　プログラムソースリスト

プログラムのソースリストを参考のため以下のページに示す。これは，著者が農林水産研究計算センターの計算システム用に書き替えてさらに修正改良中のものである。

本プログラム中の主要モジュール（プログラム単位）名とその役割は次の通りである。

- MAIN (MAC 107)……対象とする空間スケール，差分スケールの設定等を行い，PROGに引渡す。
- BNDARY……境界流速等の設定をする。
- LPLT2 ……ラインプリンタでマーカープロット図を作成する。
- MARKER……マーカーの移動を行う。
- ◉PROG……主要な計算は本モジュール内で行う。
- UF ……先端部の位置・移動速度を求めるために付加したもの。
- VISCO……乱流粘性係数モデル（現在テスト中）。

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS              ON1                      PAGE        2

  ALT #      C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

                 PROGRAM MAC107
           C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00000100
           C     TAKEUCHI/PROG107D-V02/1981.06./ACOS-800 SYSTEM/
           C  TAKEUCHI/PROG106D/1980.05./                                                00000200
           C    MARKER-AND-CELL METHOD                                                   00000300
           C     2-DIMENSIONAL STRATIFIED DENSITY CURRENTS (WITH FREE-SURFACE)           00000400
           C    TWO-DIMENSIONAL NAVIER-STOKES                                            00000500
           C  *    * -  *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    * *00000600
           C    IMPROVED SURFACE CONDITION                                               00000700
           C    SURFACE PRESSURE INTERPOLATION SCHEME IS APPLIED                        00000800
           C* * * * *,* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00000900
           C----                                                                         00001000
           C  DATA CARD                                                                  00001100
           C   1. NAME                                                                   00001200
           C         FORMAT(18A4)                                                        00001300
           C   2. IBAR,JBAR,DX,DY,DT,BO                                                  00001400
           C         FORMAT(2I5,4F10.0)                                                  00001500
           C   3. BCB,BCR,BCT,BCL,VNU,EPSD,GY,GY                                         00001600
           C         FORMAT(4F3.0,F8.0,3F10.0)                                           00001700
           C   4. TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW                                          00001800
           C         FORMAT(5F10.0,I1,2X,I2)
           C   5. ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,        00002000
           C     NXB,NYB,ULL,URR,RLL                                                     00002100
           C         FORMAT(I3,2I1,15I5/3F10.0)                                          00002200
           C   6. IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,UO,VO,RO                                         00002300
           C         FORMAT(I1,I4,I5,7F10.0)                                             00002400
           C----                                                                         00002500
           C  CARD NO.1                                                                  00002600
           C     NAME     : PROBLEM IDENTIFICATION NAME                                  00002700
           C                    ( 72 CHARACTERS, FIRST COLUMN MUST BE BLANK)             00002800
           C  CARD NO.2                                                                  00002900
           C     IBAR     : # OF INSIDE CELLS IN X-DIRECTION                             00003000
           C     JBAR     : # OF INSIDE CELLS IN Y-DIRECTION                             00003100
           C     DX       : THE CELL SIZE IN THE X-DIRECTION                             00003200
           C     DY       : THE CELL SIZE IN THE Y-DIRECTION                             00003300
           C     DT       : THE TIME STEP                                                00003400
           C     BO       : THE RELAXATION PARAMETER IN THE 'PSI' ITERATION (1.9)        00003500
           C  CARD NO.3                                                                  00003600
           C     BCB,BCR,BCT,BCL :                                                       00003700
           C                BOUNDARY CONDITIONS FOR RIGID WALL (OR WALL SECTION)         00003800
           C                  ON BOTTOM, RIGHT, TOP AND LEFT MESH BOUNDARIES.            00003900
           C                    '1.0'     FREE-SLIP                                      00004000
           C                    '-1.0'    NO-SLIP                                        00004100
           C                    '0.0'     HALF-SLIP                                      00004200
           C     VNU      : THE CONSTANT KINEMATIC VISCOSITY COEFFICIENT                  00004300
           C     VNU ｶﾞ 0 ﾉﾄｷ VISCOSITY ﾊ SMAGORINSKI-DEARDORFF ﾓﾃﾞﾙ ﾃﾞ ﾓﾄﾒﾙ
           C     EPSD     : THE CONVERGENCE CRITERION FOR 'PSI' CALCULATION (0.001)
           C     GX       : GRAVITY IN THE X-DIRECTION                                   00004500
           C     GY       : GRAVITY IN THE Y-DIRECTION (-980.0)                          00004600
           C  CARD NO.4                                                                  00004700
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS              ON1                      PAGE        5

  ALT #      C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

           C     TO       : THE STARTING TIME (0.0)                                      00004800
           C     TWPRT    : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN CELL PRINTS                00004900
           C     TWT      : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN TAPE DUMP                  00005000
           C     TWFIN    : PROBLEM FINISH TIME                                          00005100
           C     XPR      : INTERVALS OF PROBLEM TIME BETWEEN KF/H/LPLOT PRINTS          00005200
           C     IPR      : CONTROL CODE FOR 'XPR' (3)                                   00005300
           C     IW       : TAPE DUMP FILE REFERENCE #
           C  CARD NO.5                                                                  00005500
           C     ITYPE    : OBSTACLE AND/OR INFLOW/OUTFLOW ﾉ ﾄｷ ｲｶﾞｲ ﾊ 0.
           C     ITYPEL,ITYPER : TYPE CODE OF LEFT/RIGHT BOUNDARIES.
           C     L1 - L13 : DIMENSIONS SHOWN IN FOLLOWING FIG.                           00005800
           C          (L9 - L13 IS NOT USED, BUT IN PREPARATION FOR FUTURE USE)          00005900
           C                                                                             00006000
           C                                                                             00006100
           C                *************************************                        00006200
           C                *                                   *                        00006300
           C                *                                   *------                  00006400
           C          -------*                                         !                 00006500
           C          !                                   ---->(UR)   !                  00006600
           C          !     ---->(UL,RL)                              (L4)               00006700
           C         (L2)                                           *---  !              00006800
           C          ! ---*           ***************---           * !   !              00006900
           C          !   ! *          ************* !              * !   !              00007000
           C          !(L1)*           *************(L7)            *(L3)!               00007100
           C          !   ! *          ************* !              * !   !              00007200
           C          ------*****************************************------              00007300
           C                !---(L5)-->!            !
           C                !                       !
           C                !---------- (L6) ----->!
           C                                                                             00007700
           C                                                                             00007800
           C     NXB,NYB : # OF PARTICLES/CELL TO BE CREATED AT THE INFLOW               00007900
           C                    BOUNDARY IN THE X- AND Y-DIRECTIONS                      00008000
           C     ULL      : PRESCRIBED INFLOW VELOCITY                                   00008100
           C     URR      : PRESCRIBED OUTFLOW VELOCITY                                  00008200
           C                    OUTFLOW CONTINUATIVE IF URR=0.                           00008300
           C     RLL      : PRESCRIBED INFLOW DENSITY                                    00008400
           C  CARD NO.6
           C     IPN      : PARTICLE TYPE CODE '1'(PA),'2'(PB),'3-9'(H)
           C     NX,NY    : # OF PARTICLES/CELL TO BE CREATED FOR THIS PART             00008700
           C                    IN THE X- AND Y-DIRECTIONS                               00008800
           C     XC,YC,XD,YD : PART DIMENSIONS IN PROBLEM UNITS                          00008900
           C     UO,VO    : INITIAL VELOCITY COMPONENT OF THE PART                       00009000
           C     RO       : INITIAL DENSITY OF THE PART                                  00009100
           C----                                                                         00009200
           C   TAPE RESTART IF IBAR=0 IN CARD NO.2                                       00009300
           C        1. NAME    :FORMAT(18A4)                                             00009400
           C        2. IBAR=0  (BLANK CARD)                                              00009500
           C        3. IP2,JP2:FORMAT(2I5)                                               00009600
           C        4. T,PE,TWFIN,IPR,IW,IRF,TDT,TPT
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                    PAGE          4

  ALT #      CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

   101          C----                                                                   00009900
   102          C  COMMENT                                                              00010000
   103          C      ITYPE = 0  ; NO-INFLOW/OUTFLOW                                   00010100
   104          C      ITYPEL ｶﾞ 1 - 7 ﾉ ﾄｷ UL=CONST. & RL=CONST.
   105          C      ITYPER ｶﾞ 1- 8 ﾃﾞｶﾂ URR=0 ﾉﾄｷ ﾊ CONTINUATIVE OUTFLOW
   106          C      ITYPEL=8  READ RL(L1--L8)      ( UL=CONST. )                     00010400
   107          C      ITYPEL=9  READ RL(L1--L8) & UL(L1--L2)                           00010500
   108          C      ITYPER=9  READ UR(L3--L4)                                        00010600
   109          C     TYPE ｶｰﾄﾞ ﾊ 2 ﾏｲ ﾃﾞ ﾋﾄｸﾐ (ITYPE ｶﾞ 0 ｲｶ ﾉ ﾄｷ ﾊ 1 ｸﾐ, ITYPE ｶﾞ ｾｲ
   110          C         ﾉﾄｷ ﾊ ﾌｸｽｳ ｸﾐ ﾃﾞﾓ ﾖｲ. ﾀﾀﾞｼ ｻｲｺﾞ ﾊ ITYPE ｶﾞ ｾﾞﾛ ﾉ ｸﾐ)
   111          C     IPN >= 3 ﾉﾄｷ XC ｶﾞ ﾌ ﾅﾗﾊﾞ CONFINED FLOW
   112          C         UF ﾌﾖｳ ﾉﾄｷ ﾊ XD ﾆ ﾌ ｦ ｱﾀｴﾙｺﾄ.
   113          C     IPN=3 ﾉ ﾄｷ H ﾊ YC ﾃﾞ ｱﾀｴﾙ
   114          C     IPN >=4 ﾅﾗﾊﾞ ICYCLE=0 / PRINT ﾅｼ
   115          C     IPN >=7 ﾅﾗﾊﾞ ICYCLE=0 / LPLT ﾅｼ
   116          C     # OF OBSTACLES SHOULD BE LESS THAN OR EQUAL TO 'LH'
   117          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00011100
   118                IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
   119                PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
   120                PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
   121                CHARACTER LNAME*40
   122                COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
   123               1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,  00011400
   124               2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
   125               3 ICYCLE,NUITD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME,
   126               4 I1(LDM),I2(LDM)
   127                COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
   128               1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
   129               2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
   130               3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,     00012100
   131               4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                                           00012200
   132               5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
   133               6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
   134                EQUIVALENCE (I1(1),IFL),(I2(1),KF),(A1(1),U),                     00012500
   135               1 (A2(1),V),(A3(1),UTIL ),(A4(1),VTIL),                             00012600
   136               2 (A5(1),PPP),(A6(1),R),(A7(1),VIS)                                 00012700
   137          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00012800
   138                DATA LNAME/'  TAKEUCHI / PROG107D-V02 / 1981.06. /   '/
   139             1 FORMAT(2I5,5F10.0)                                                 00013000
   140             2 FORMAT('0  DATA ERROR (IALL=IP2*JP2)',I10)                         00013100
   141             3 FORMAT(18A4)
   142             4 FORMAT(1H1//'  DATA NAME=',18A4)
   143          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00013400
   144                IBND=1                                                            00013600
   145                IFUL=2                                                            00013700
   146                ISUR=3                                                            00013800
   147                IEMP=4                                                            00013900
   148                IOB=5                                                             00014000
   149          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00014100
   150                READ(5,3) NAME                                                    00014200
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                    PAGE          5

  ALT #      CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

   151                WRITE(6,4) NAME                                                   00014300
   152            10 READ(5,1)IBAR,JBAR,DX,DY,DT,RO                                     00014400
   153                IP2=IBAR+2                                                        00014500
   154                JP2=JBAR+2                                                        00014600
   155                IF(IBAR.EQ.0)READ(5,1)IP2,JP2                                     00014700
   156                IF(IBAR)30,20,20                                                  00014800
   157            20 CONTINUE                                                           00014900
   158                IALL=IP2*JP2                                                      00015000
   159                IF(IALL.GT.LDM.OR.IALL.LE.0)GOTO 90                               00015100
   160                CALL PROG(IP2,JP2,IFL,U,V,UTIL,VTIL, PPP,R ,VIS,KF)              00015200
   161          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00015300
   162            30 STOP 'END OF JOB'                                                  00015400
   163            90 WRITE(6,2)IALL                                                     00015500
   164                STOP ' DATA ERROR '                                               00015600
   165                END                                                               00015700
   166                SUBROUTINE  BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,ICN)                     00015800
   167                IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
   168                PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
   169                PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
   170                COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
   171               1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,  00016200
   172               2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
   173               3 ICYCLE,NUITD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
   174               4 I1(LDM),I2(LDM)
   175                COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
   176               1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
   177               2 YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
   178               3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,     00016900
   179               4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                                           00017000
   180               5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
   181               6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
   182                DIMENSION IFL(IP2,JP2),U(IP2,JP2),V(IP2,JP2),R(IP2,JP2),
   183               *  VIS(IP2,JP2)
   184            42 FORMAT('   RMM=',1PE15.6)                                             00017500
   185          C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * .00017600
   186                GOTO (100,200,300,400,500,600),ICN                                00017700
   187          CCC                                                                     00017800
   188          C100  JUST OUTSIDE TANGENTIAL VELOCITIES                                00017900
   189          CCC                                                                     00018000
   190           100 DO 150 J=2,JP1                                                     00018100
   191                DO 150 I=2,IP1                                                    00018200
   192                IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 150                                      00018300
   193                RSQ=1.0D0/SQRT(DX**2+((H(I)-H(I-1))*DY)**2)                       00018400
   194                ACOS=DX*RSQ                                                       00018500
   195                ASIN=(H(I)-H(I-1))*DY*RSQ                                         00018600
   196                RMM=ACOS**2-ASIN**2                                               00018700
   197                IF(RMM.LE.1.0D-3)GOTO 149                                         00018800
   198                RRM=1.0D0/RMM                                                     00018900
   199                U(I,J+1)=U(I,J)-2.0*ACOS*ASIN*DY*RRM
   200               1 *(0.5*RDY*(V(I,J)+V(I+1,J)-V(I,J-1)-V(I+1,J-1))
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS          ON1                PAGE

ALT #     C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

          2  -0.5*ROX*(U(I+1,J)-U(I-1,J)))
          3 -DYODX*(V(I,J)-V(I-1,J))
        GOTO 150                                                     00019300
  149 WRITE(6,42) RMM                                                00019400
      STOP 'ERROR (RMM)'                                             00019500
  150 CONTINUE                                                       00019600
CCC                                                                  00019700
      DO 160 I=2,IP1
      U(I,1)=U(I,2)*BCB                                              00019900
  160 U(I,JP2)=U(I,JP1)*BCT                                          00020000
      DO 170 J=2,JP1
      V(1,J)=V(2,J)*BCLT(J)                                          00020200
  170 V(IP2,J)=V(IP1,J)*BCRT(J)                                      00020300
      RETURN                                                         00020400
CCC                                                                  00020500
C200  JUST INSIDE OBSTACLE VELOCITIES                                00020600
CCC                                                                  00020700
  200 IF(ITYPE.EQ.0)RETURN                                           00020800
      DO 250 J=2,JP1                                                 00020900
      DO 250 I=2,IP1                                                 00021000
      IF(IFL(I,J).NE.IOB) GOTO 240                                   00021100
      U(I,J)=0.0                                                     00021200
      V(I,J)=0.0                                                     00021300
      IF(IFL(I,J+1).NE.IOB.AND.IFL(I+1,J).EQ.IOB)U(I,J)=U(I,J+1)*HCB 00021400
      IF(IFL(I,J-1).NE.IOB.AND.IFL(I+1,J).EQ.IOB)U(I,J)=U(I,J-1)*HCB 00021500
      IF(IFL(I-1,J).NE.IOB.AND.IFL(I,J+1).EQ.IOB)V(I,J)=V(I-1,J)*HCB 00021600
      IF(IFL(I+1,J).NE.IOB.AND.IFL(I,J+1).EQ.IOB)V(I,J)=V(I+1,J)*HCB 00021700
      GOTO 250                                                       00021800
  240 CONTINUE                                                       00021900
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IOB) U(I,J)=0.0                               00022000
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IOB) V(I,J)=0.0                               00022100
  250 CONTINUE                                                       00022200
      RETURN                                                         00022300
CCC                                                                  00022400
C300  SURFACE VELOCITIES                                             00022500
CCC                                                                  00022600
  300 DO 370 J=2,JP1                                                 00022700
      DO 370 I=2,IP1                                                 00022800
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 370                                   00022900
      N=0                                                            00023000
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)N=N+1                                    00023100
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)N=N+2                                    00023200
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)N=N+4                                    00023300
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)N=N+8                                    00023400
      GOTO (351,352,353,354,351,355,352,357,358,352,351,359,351,352,351)00023500
     X ,N                                                            00023600
  351 U(I,J)=U(I-1,J)-DXODY*(V(I,J)-V(I,J-1))                        00023700
      GOTO 370                                                       00023800
  352 V(I,J)=V(I,J-1)-DYODX*(U(I,J)-U(I-1,J))                        00023900
      GOTO 370                                                       00024000


STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS          ON1                PAGE

ALT #     C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W - S T A R   C   F I L E

  353 U(I,J)=U(I-1,J)                                                00024100
      GOTO 356                                                       00024200
  354 U(I-1,J)=U(I,J)+DXODY*(V(I,J)-V(I,J-1))                        00024300
      GOTO 370                                                       00024400
  355 U(I-1,J)=U(I,J)                                                00024500
  356 V(I,J)=V(I,J-1)                                                00024600
      GOTO 370                                                       00024700
  357 V(I,J-1)=V(I,J)+DYODX*(U(I,J)-U(I-1,J))                        00024800
      GOTO 370                                                       00024900
  358 U(I,J)=U(I-1,J)                                                00025000
      GOTO 360                                                       00025100
  359 U(I-1,J)=U(I,J)                                                00025200
  360 V(I,J-1)=V(I,J)                                                00025300
  370 CONTINUE                                                       00025400
      RETURN                                                         00025500
CCC                                                                  00025600
C400  BOUNDARY DENSITIES                                             00025700
CCC                                                                  00025800
  400 CONTINUE                                                       00025900
      DO 470 J=2,JP1                                                 00026000
      DO 470 I=2,IP1                                                 00026100
      IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 470                                   00026200
      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)R(I+1,J)=R(I,J)                          00026300
      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)R(I,J+1)=R(I,J)                          00026400
      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)R(I-1,J)=R(I,J)                          00026500
      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)R(I,J-1)=R(I,J)                          00026600
  470 CONTINUE                                                       00026700
      IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 460                                         00026800
      DO 450 J=2,JP1                                                 00026900
      DO 450 I=2,IP1                                                 00027000
      IF(IFL(I,J).NE.IOB)GOTO 450                                    00027100
      IF(IFL(I,J+1).LE.ISUR.AND.IFL(I,J+1).EQ.IOB)R(I,J)=R(I,J+1)
      IF(IFL(I,J-1).LE.ISUR.AND.IFL(I,J-1).EQ.IOB)R(I,J)=R(I,J-1)
      IF(IFL(I-1,J).LE.ISUR.AND.IFL(I-1,J).EQ.IOB)R(I,J)=R(I-1,J)
      IF(IFL(I+1,J).LE.ISUR.AND.IFL(I+1,J).EQ.IOB)R(I,J)=R(I+1,J)
  450 CONTINUE                                                       00027600
  460 CONTINUE                                                       00027700
      DO 410 I=2,IP1                                                 00027800
      R(I,1)=R(I,2)                                                  00027900
  410 R(I,JP2)=R(I,JP1)                                              00028000
      DO 420 J=2,JP1                                                 00028100
      IF(ULL.NE.0.0)GOTO 415                                         00028200
      R(1,J)=R(2,J)                                                  00028300
  415 R(IP2,J)=R(IP1,J)                                              00028400
  420 CONTINUE                                                       00028500
      RETURN                                                         00028600
CCC                                                                  00028700
C500  BOUNDARY  VISCOSITIES                                          00028800
CCC                                                                  00028900
  500 CONTINUE                                                       00029000
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                        PAGE         8

    ALT #       CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

     301                  DO 570 J=2,JP1                                                      00029100
     302                  DO 570 I=2,IP1                                                      00029200
     303                  IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 570                                        00029300
     304                  IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)VIS(I+1,J)=VIS(I,J)                           00029400
     305                  IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)VIS(I,J+1)=VIS(I,J)                           00029500
     306                  IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)VIS(I-1,J)=VIS(I,J)                           00029600
     307                  IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)VIS(I,J-1)=VIS(I,J)                           00029700
     308              570 CONTINUE                                                            00029800
     309                  IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 560                                              00029900
     310                  DO 550 J=2,JP1                                                      00030000
     311                  DO 550 I=2,IP1                                                      00030100
     312                  IF(IFL(I,J).NE.IOB)GOTO 550                                         00030200
     313                  IF(IFL(I,J+1).LE.ISUR.AND.IFL(I,J+1).EQ.IOB)VIS(I,J)=VIS(I,J+1)
     314                  IF(IFL(I,J-1).LE.ISUR.AND.IFL(I,J-1).EQ.IOB)VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
     315                  IF(IFL(I-1,J).LE.ISUR.AND.IFL(I-1,J).EQ.IOB)VIS(I,J)=VIS(I-1,J)
     316                  IF(IFL(I+1,J).LE.ISUR.AND.IFL(I+1,J).EQ.IOB)VIS(I,J)=VIS(I+1,J)
     317              550 CONTINUE                                                            00030700
     318              560 CONTINUE                                                            00030800
     319                  DO 510 I=2,IP1                                                      00030900
     320                  VIS(I,1)=VIS(I,2)                                                   00031000
     321              510 VIS(I,JP2)=VIS(I,JP1)                                               00031100
     322                  DO 520 J=2,JP1                                                      00031200
     323                  VIS(1,J)=VIS(2,J)                                                   00031300
     324              520 VIS(IP2,J)=VIS(IP1,J)                                               00031400
     325             CCC                                                                      00031500
     326              600 CONTINUE                                                            00031600
     327                  RETURN                                                              00031700
     328                  END                                                                 00031800
     329                  SUBROUTINE LPLT2(NX,NY,NPA,PA,NPB,PB)                               00031900
     330                  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
     331                  REAL*4 PA,PB                                                        00032100
     332                  REAL*4 XS,YS                                                        00032200
     333                  CHARACTER*1 LPLOT,LBLANK,LSTRK,LMINUS,LSHARP,LASTER,LXXX,LSURF
     334                  PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
     335                  PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
     336                  PARAMETER LIMAX=500,LJMAX=100
     337                  PARAMETER LPA=12000,LPB=12000
     338                  COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
     339                 1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,   00032400
     340                 2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
     341                 3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
     342                 4 I1(LDM),I2(LDM)
     343                  COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
     344                 1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
     345                 2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
     346                 3 DX,DY,DT,DYODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,     00033100
     347                 4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                                           00033200
     348                 5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
     349                 6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
     350                  DIMENSION LPLOT(LJMAX,LIMAX)
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                        PAGE         9

    ALT #       CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

     351                  DIMENSION PA(LPA),PB(LPB)
     352             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00033800
     353                  DATA LBLANK,LSTRK,LMINUS,LSHARP,LASTER,LXXX,LSURF                 00033900
     354                 # /' ','!','-','#','+','X','S'/                                    00034000
     355             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00034100
     356                1 FORMAT(1H1)                                                       00034200
     357                2 FORMAT('0 IMAX=',I5,'  IMAX>LIMAX RANGE OVER IN LPLOT')
     358                3 FORMAT('0 JMAX=',I5,'  JMAX>LJMAX RANGE OVER IN LPLOT')
     359                4 FORMAT(1H ,130A1)                                                 00034500
     360                5 FORMAT(10A4)
     361                6 FORMAT(1H0)                                                       00034700
     362               12 FORMAT(3X,18A4,'  T=',1PD12.5,'  ICYCLE=',I5,'  DATE=',2A4)
     363             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00034900
     364             1000 IXS=NX                                                            00035000
     365                  IYS=NY*2                                                          00035100
     366                  IF(NX.EQ.0.OR.NY.EQ.0) RETURN
     367                  XS=FLOAT(IXS)                                                     00035200
     368                  YS=FLOAT(IYS)                                                     00035300
     369                  IMAX=IBAR*IXS+1                                                   00035400
     370                  JMAX=JBAR*IYS+1                                                   00035500
     371                  IF(IMAX.LE.LIMAX) GOTO 1010
     372                  WRITE(6,2) IMAX                                                   00035700
     373                  NX=NX/2                                                           00035800
     374                  NY=NY/2                                                           00035900
     375                  GOTO 1000                                                         00036000
     376             1010 IF(JMAX.LE.LJMAX) GOTO 1020
     377                  WRITE(6,3) JMAX                                                   00036200
     378                  NX=NX/2                                                           00036300
     379                  NY=NY/2                                                           00036400
     380                  GOTO 1000                                                         00036500
     381             1020 CONTINUE                                                          00036600
     382             CCC                                                                    00036700
     383             C  INITIAL CLEAR                                                       00036800
     384             CCC                                                                    00036900
     385                  DO 100 I=1,IMAX                                                   00037000
     386                  DO 100 J=1,JMAX                                                   00037100
     387              100 LPLOT(J,I)=LBLANK                                                 00037200
     388             CCC                                                                    00037300
     389             C  FRAME                                                               00037400
     390             CCC                                                                    00037500
     391                  DO 110 I=1,IMAX,IXS                                               00037600
     392                  DO 110 J=1,JMAX                                                   00037700
     393              110 LPLOT(J,I)=LMINUS                                                 00037800
     394                  DO 120 I=1,IMAX                                                   00037900
     395                  DO 120 J=1,JMAX,IYS                                               00038000
     396              120 LPLOT(J,I)=LSTRK                                                  00038100
     397                  DO 130 I=1,IMAX,IXS                                               00038200
     398                  DO 130 J=1,JMAX,IYS                                               00038300
     399              130 LPLOT(J,I)=LSHARP                                                 00038400
     400             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00038500
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                          PAGE          10

   ALT #        CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

    401         C....                                                                  00038600
    402         C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00038700
    403               IF(NPA.EQ.0)GOTO 161                                             00038800
    404               DO  140 K=1,NPA                                                  00038900
    405               I=PA(2*K-1)*XS+1.5                                               00039000
    406               J=PA(2*K)*YS+1.5                                                 00039100
    407               IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 140
    408               LPLOT(J,I)=LASTER                                                00039300
    409           140 CONTINUE                                                         00039400
    410         CCC                                                                    00039500
    411           141 CONTINUE                                                         00039600
    412               IF(NPB.EQ.0)GOTO 151                                             00039700
    413               DO 150 K=1,NPB                                                   00039800
    414               I=PB(2*K-1)*XS+1.5                                               00039900
    415               J=PB(2*K)*YS+1.5                                                 00040000
    416               IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 150
    417               LPLOT(J,I)=LXXX                                                  00040200
    418           150 CONTINUE                                                         00040300
    419         CCC                                                                    00040400
    420           151 CONTINUE                                                         00040500
    421               IF(XC.LT.0.D0) GOTO 161                                          00040600
    422               DO 160 K=2,IBAR+2                                                00040700
    423               I=FLOAT(K-2)*XS+1.5                                              00040800
    424               J=H(K)*YS+1.5                                                    00040900
    425               IF(I.GT.LIMAX.OR.J.GT.LJMAX) GOTO 160
    426               LPLOT(J,I)=LSURF                                                 00041100
    427           160 CONTINUE                                                         00041200
    428           161 CONTINUE                                                         00041300
    429         C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00041400
    430         CCC                                                                    00041500
    431         C     PLOT ON L/P                                                      00041600
    432         CCC                                                                    00041700
    433               WRITE(6,1)                                                       00041800
    434               WRITE(6,5) LNAME                                                 00041900
    435               WRITE(6,12) NAME,T,ICYCLE,IDATE                                  00042000
    436               WRITE(6,6)                                                       00042100
    437               DO 200 I=1,IMAX                                                  00042200
    438               WRITE(6,4) (LPLOT(J,I),J=1,JMAX)                                 00042300
    439           200 CONTINUE                                                         00042400
    440         C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00042500
    441               WRITE(6,1)                                                       00042600
    442               RETURN                                                           00042700
    443               END                                                              00042800
    444               SUBROUTINE MARKER(IP2,JP2,IFL,U,V,NP,KN,XP)                      00042900
    445         C   MOVE & PACK MARKER PARTICLES                                       00043000
    446               IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    447               REAL*4 XP                                                        00043200
    448               PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
    449               PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
    450               PARAMETER LPA=12000,LPB=12000
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                          PAGE          11

   ALT #        CONTENTS OF THE CHANGES ON THE NEW STAR C FILE

    451               PARAMETER LXP=LPA
    452               COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IOND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
    453              1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,  00043400
    454              2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
    455              3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
    456              4 I1(LDM),I2(LDM)
    457               COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
    458              1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
    459              2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
    460              3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,    00044100
    461              4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                                          00044200
    462              5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
    463              6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
    464               DIMENSION IFL(IP2,JP2),U(IP2,JP2),V(IP2,JP2)
    465               DIMENSION XP(LXP)
    466               NPT=0                                                            00044700
    467               NPN=0                                                            00044800
    468               K=1                                                              00044900
    469               KN=1                                                             00045000
    470           100 IF(NPT.GE.NP)GOTO 140                                            00045100
    471               ID=XP(K)+2.0                                                     00045200
    472               HPX=ID-1.0-XP(K)                                                 00045300
    473               HMX=1.0-HPX                                                      00045400
    474               JR=XP(K+1)+1.5                                                   00045500
    475               HPY=JR-0.5-XP(K+1)                                               00045600
    476               HMY=1.0-HPY                                                      00045700
    477               UK=HPX*HMY*U(ID-1,JR+1)+HMX*HMY*U(ID,JR+1)                       00045800
    478              #    +HPX*HPY*U(ID-1,JR)+HMX*HPY*U(ID,JR)                         00045900
    479               IR=XP(K)+1.5                                                     00046000
    480               HPX=IR-0.5-XP(K)                                                 00046100
    481               HMX=1.0-HPX                                                      00046200
    482               JD=XP(K+1)+2.0                                                   00046300
    483               HPY=JD-1.0-XP(K+1)                                               00046400
    484               HMY=1.0-HPY                                                      00046500
    485               VK=HPX*HMY*V(IR,JD)+HMX*HMY*V(IR+1,JD)                           00046600
    486              #    +HPX*HPY*V(IR,JD-1)+HMX*HPY*V(IR+1,JD-1)                     00046700
    487               XP(KN)=XP(K)+UK*DTODX                                            00046800
    488               XP(KN+1)=XP(K+1)+VK*DTODY                                        00046900
    489               I=XP(KN)+2.0                                                     00047000
    490               J=XP(KN+1)+2.0                                                   00047100
    491               IF(ITYPE.EQ.0)GOTO 110                                           00047200
    492               IF(XP(KN).LE.-1.OR.XP(KN+1).LE.-1.                               00047300
    493              # OR.XP(KN+1).GE.JP1) GOTO 900                                    00047400
    494               IF(XP(KN).GE.IBAR)GOTO 130                                       00047500
    495               GOTO 115                                                         00047600
    496           110 IF(XP(KN).GE.IP1.OR.XP(KN).LE.-1.OR.XP(KN+1).GE.JP1.             00047700
    497              # OR.XP(KN+1).LE.-1) GOTO 900                                     00047800
    498           115 KN=KN+2                                                          00047900
    499               NPN=NPN+1                                                        00048000
    500           120 IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 130                                     00048100
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                        PAGE        12

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    501                    IFL(I,J)=ISUR                                                       00048200
    502                    IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)U(I,J)=U(ID,JD)                               00048300
    503                    IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)U(I-1,J)=U(ID-1,J)                            00048400
    504                    IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)V(I,J)=V(ID,JD)                               00048500
    505                    IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)V(I,J-1)=V(ID,JD-1)                           00048600
    506                130 K=K+2                                                               00048700
    507                    NPT=NPT+1                                                           00048800
    508                    GOTO 100                                                            00048900
    509                160 NP=NPN                                                              00049000
    510                    RETURN                                                              00049100
    511                900 WRITE(6,90) KN,NPN,XP(KN),XP(KN+1),UK,VK                            00049200
    512                 90 FORMAT('  KN=',I5,'  NPN=',I4,'  XP=',2D15.7,                       00049300
    513                   # '  UK,VK=',2D15.7)                                                 00049400
    514                    STOP 'MARKER ERROR'                                                 00049500
    515                    END                                                                 00049600
    516                    SUBROUTINE PROG(IP2,JP2,IFL,U,V,UTIL,VTIL, PPP,R ,VIS,KF)           00049700
    517              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00049800
    518                    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    519                    REAL*4 FL,PA,PB                                                     00050100
    520                    PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
    521                    PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
    522                    PARAMETER LPA=12000,LPB=12000
    523                    PARAMETER LOBST=LB,LJBAR=MJ-2
    524                    COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,
    525                   1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,  00050300
    526                   2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
    527                   3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
    528                   4 I1(LDM),I2(LDM)
    529                    COMMON/RC/TAPE,BO,BCB,BCL,BCT,BCR,HCLT(MJ),HCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
    530                   1 EPSD,DETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
    531                   2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
    532                   3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,     00051000
    533                   4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                                            00051100
    534                   5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
    535                   6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
    536                     EQUIVALENCE (L13,IPN)
    537              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00051400
    538                    DIMENSION IFL(IP2,JP2),KF(IP2,JP2),U(IP2,JP2),V(IP2,JP2),
    539                   1  UTIL(IP2,JP2),VTIL(IP2,JP2),PPP(IP2,JP2),R(IP2,JP2),VIS(IP2,JP2)
    540                    DIMENSION PA(LPA),PB(LPB),HS(MJ),HO(LPS)
    541                    DIMENSION FL(5)                                                     00051900
    542                      DATA FL/'BND','FUL','SUR','EMP','OB'/                             00052000
    543                    DIMENSION NNAME(18)                                                 00052100
    544              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00052200
    545                  1 FORMAT(1H1)                                                         00052300
    546                  2 FORMAT(18A4)
    547                  3 FORMAT(4F3.0,F8.0,4F10.0)                                           00052500
    548                  4 FORMAT(5F10.0,I1,2X,I2)
    549                  5 FORMAT('  IBAR=',I4,'  JBAR=',I4,'  DX=',F8.3,'  DY=',F8.3,         00052700
    550                   # '  DT=',F8.5,'   BO=',F8.5)                                         00052800
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                    ON1                        PAGE        15

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    551                  6 FORMAT('  BC(B,L,T,R)=',4(F4.1,1X),'  VNU=',F8.4,'  EPSD=',F8.5, 00052900
    552                   # '  GX=',F8.3,'  GY=',F8.3)                                        00053000
    553                  7 FORMAT('  T=',F8.5,'  TWPRT=',F8.5,'  TWT=',F8.5,'  TWFIN=',F8.5, 00053100
    554                   # '  XPR=',F8.5,'  IPR=',I2,'  IW=',I2)                             00053200
    555                  8 FORMAT(I3,2I1,15I5/3F10.0)                                         00053300
    556                  9 FORMAT('  ITYPE=',I3,'  ITYPEL=',I1,'  ITYPER=',I1,'  L1=',I3,     00053400
    557                   # '  L2=',I3,'  L3=',I3,'  L4=',I3,'  L5=',I3,'  L6=',I3,           00053500
    558                   # '  L7=',I3,'  L8=',I3,'  L9=',I3,'  L10=',I3,'  L11=',I3,         00053600
    559                   # /'   L12=',I3,'  L13=',I3,'  NXB=',I3,'   NYB=',I3,              00053700
    560                   # '  ULL=',F8.4,'  URR=',F8.4,'  RLL=',F8.5)                        00053800
    561                 10 FORMAT('   NUMBER OF CELLS IN SYSTEM      IALL=',I5)              00053900
    562                 11 FORMAT(8F10.0)                                                     00054000
    563                 12 FORMAT('0  NG=',I5)                                                00054100
    564                 13 FORMAT(10X,'GT=',F8.4,5X,'GO=',F8.3)                               00054200
    565                 14 FORMAT('0   NO OBST OR I/O BOUNDARIES')                            00054300
    566                 15 FORMAT(I1,I4,I5,7F10.0)                                            00054400
    567                 16 FORMAT('  IPN=',I2,'  NX=',I3,'  NY=',I3,'  XC=',F8.4,'  YC=',     00054500
    568                   # F8.4,'  XD=',F8.4,'  YD=',F8.4,'  UO=',F8.4,'  VO=',F8.4,         00054600
    569                   # '  RO=',F8.5)                                                     00054700
    570                 17 FORMAT('0  STORAGE (PA) EXAUSTED',I10)                             00054800
    571                 18 FORMAT('0  STORAGE (PB) EXAUSTED',I10)                             00054900
    572                 19 FORMAT('   NUMBER OF PARTICLES IN SYSTEM   NPA=',I5,'   NPB=',I5) 00055000
    573                 20 FORMAT(1H ,70X,'CTSL=',F10.4,'   CTIME=',F10.4,' (SEC)')
    574                 21 FORMAT(18A4,'  T=',1PD12.5,'  ICYCLE=',I5,'  IDATE=',2A4/)
    575                 22 FORMAT('     I',4X,'J',4X,'FLAG',11X,'U',11X,'V',9X,'PIJ',11X,'D', 00055300
    576                   # 9X,'UIJ',9X,'VIJ',11X,'R',9X,'VIS')                              00055400
    577                 23 FORMAT(1H ,2I5,4X,A4,1P9D12.4)                                     00055500
    578                 24 FORMAT('  NUMTD=',I4,'   T=',1PD12.5,'   ICYCLE=',I5)              00055600
    579                 25 FORMAT(1H0,'IP2=',I4,4X,'JP2=',I4)                                 00055700
    580                 26 FORMAT('   TDT=',F8.5,'   TPT=',F8.5)                              00055800
    581                 27 FORMAT('  J=',I3,'  KF=',30I4)                                     00055900
    582                 28 FORMAT(1H0)                                                        00056000
    583                 29 FORMAT(2F10.0,I1,2I2,5X,2F10.0)
    584                 30 FORMAT('  RESTARTING FROM NUMTD=',I5)                              00056200
    585                 31 FORMAT('   TIME=',1PD12.5,'   ICYCLE=',I5,'   ITERD=',I6,          00056300
    586                   # '  DMAX=',D12.5,5X,'(',I3,',',I3,')')                            00056400
    587                 32 FORMAT('0  STORAGE (PD) EXAUSTED',I10)                             00056500
    588                 34 FORMAT('   H ',10F12.4)                                            00056600
    589                 36 FORMAT('   J,UL'/5(I5,F15.4))                                      00056700
    590                 37 FORMAT('   J,RL'/5(I5,F15.4))                                      00056800
    591                 38 FORMAT('   J,UR'/5(I5,F15.4))                                      00056900
    592                 39 FORMAT('   IDATE=',2A4)
    593                 40 FORMAT('   TAPE=',F8.5,'  TWFIN=',F8.5,'  IPR=',I2,'  IW=',I2,
    594                   * '  IRF=',I2)
    595                 41 FORMAT(12X,30A4)
    596              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * 00057200
    597              C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *  *00057300
    598              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00057400
    599                    CALL DATIM(IDATE,CTM)                                              *00057500
    600                    CALL PTIME(CT1)
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                  PAGE        14

 ALT #     C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

                      CTS=CT1
                      LPX=4                                                      00058500
                      LPY=4                                                      00058600
                      WRITE(6,2) LNAME                                           00058700
                      IF(IBAR.EQ.0)GOTO 460                                      00058800
                      READ(5,3) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD, GX,GY                  00058900
                      READ(5,4) TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW                    00059000
                      IF(EPSD.LE.0.0) EPSD=0.001
                      IF(GY.EQ.0.) GY=-980.D0                                    00059200
                      IF(TO.LT.0.0) TO=0.0                                       00059300
                      IF(XPR.LE.0.0) XPR=TWPRT                                   00059400
                      IF(IPR.LT.1.OR.IPR.GT.4) IPR=3                             00059500
                      IF(B0.EQ.0.D0) B0=1.9D0                                    00059600
                      WRITE(6,39) IDATE                                          00059800
                      WRITE(6,5) IBAR,JBAR,DX,DY,DT,B0                           00059900
                      WRITE(6,6) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD,GX,GY                  00060000
                      WRITE(6,7) TO,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW                   00060100
                  C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00060200
                  C    DATA CHECK                                                00060300
                  CCC                                                            00060400
                      IF(DX.LE.0.D) STOP 'DATA ERROR (DX)'                       00060500
                      IF(DY.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (DY)'                       00060600
                      IF(DT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (DT)'                       00060700
                      IF(TWPRT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWPRT)'                 00061300
                      IF(TWT.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWT)'                     00061400
                      IF(TWFIN.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWFIN)'                 00061500
                  C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00061600
                      DO 51 I=1,IALL                                             00061700
                   51 A7(I)=VNU                                                  00061800
                  C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00061900
                  CCC                                                            00062000
                      IP1=IBAR+1                                                 00062100
                      JP1=JBAR+1                                                 00062200
                      RDT=1.0D0/DT                                               00062300
                      RDX=1.0D0/DX                                               00062400
                      RDX2=RDX*RDX                                               00062500
                      RDY=1.0D0/DY                                               00062600
                      RDY2=RDY*RDY                                               00062700
                      RDXDY=RDX*RDY                                              00062800
                      DTODX=DT*RDX                                               00062900
                      DTODY=DT*RDY                                               00063000
                      DXODY=DX*RDY                                               00063100
                      DYODX=DY*RDX                                               00063200
                      BETA = B0*0.5D0*RDT/(RDX2+RDY2)                            00063300
                      TPRT=TWPRT                                                 00063400
                      TT=TWT                                                     00063500
                      TWPRT=TPRT+TO                                              00063600
                      TWT=TT+TO                                                  00063700
                      ICYCLE=0                                                   00063800
                      NUMTD=0                                                    00063900
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                  PAGE        15

 ALT #     C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

                      NUMPR=0                                                    00064000
                      IXP=0                                                      00064100
                      IXPR=XPR*RDT+1.001D0                                       00064200
                      IGATE=0                                                    00064300
                      IOBST=1                                                    00064400
                      NOBST=0                                                    00064500
                  CCC                                                            00064600
                  CCC ｷﾖｳｶｲ ｾﾙ                                                   00064700
                  CCC                                                            00064800
                      DO 60 J=2,JP1                                              00064900
                      DO 60 I=2,IP1                                              00065000
                      IFL(I,J)=IEMP                                              00065100
                      IF(I.EQ.2)IFL(I-1,J)=IBND                                  00065200
                      IF(J.EQ.2)IFL(I,J-1)=IBND                                  00065300
                      IF(I.EQ.IP1)IFL(I+1,J)=IBND                                00065400
                      IF(J.EQ.JP1)IFL(I,J+1)=IBND                                00065500
                   60 CONTINUE                                                   00065600
                  CCC                                                            00065700
                  CCC ﾘﾕｳﾆﾕｳ/ﾘﾕｳｼﾕﾂ ｾﾙ                                           00065800
                  CCC                                                            00065900
                      DO 65 J=1,JP2                                              00066000
                      BCLT(J)=BCL                                                00066100
                      BCRT(J)=BCR                                                00066200
                      ROS(J)=1.0D0                                               00066300
                   65 CONTINUE                                                   00066400
                  CCC                                                            00066500
                  CCC ﾀｲﾌﾟｶｰﾄﾞ ﾖﾐﾄﾘｼﾖﾘ                                           00066600
                  CCC                                                            00066700
                   69 CONTINUE                                                   00066800
                      READ(5,8) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,     00066900
                     # L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL                           00067000
                      WRITE(6,9) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,     00067200
                     # L10,L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL                       00067300
                      IF(ITYPEL.LT.6)L8=L2
                      IF(ITYPEL.LT.2)L8=L1
                      IF(L8.NE.L2) RA=RLL
                      IF(L8.NE.L1) RH=RLL
                      IF(ITYPE)70,90,80                                          00067400
                   70 READ(5,8) NG                                               00067500
                      WRITE(6,12) NG                                             00067600
                      IF(NG.LE.0) STOP 'DATA ERROR (NG)'                         00067700
                      READ(5,11)(GT(I),GO(I),I=1,NG)                             00067800
                      WRITE(6,13) (GT(I),GO(I),I=1,NG)                           00067900
                      ASSIGN 100 TO KRET                                         00068000
                      GOTO 160                                                   00068100
                   80 ASSIGN 69 TO KRET                                          00068200
                      GOTO 150                                                   00068300
                   90 CONTINUE                                                   
                      IF(IOBST.NE.1) ITYPE=IOBST-1                               00068500
                      IF(IGATE.NE.0) ITYPE=IGATE                                 00068600
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                  ON1                      PAGE          16

  ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

   701                   IF(ITYPE.EQ.0) WRITE(6,14)
   702             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00068700
   703             CCC   ﾏｰｶｰ ﾉ ｾﾂﾃｲ                                                      00068800
   704             CCC                                                                  00068900
   705               100 KA=1                                                           00069000
   706                   NPA=0                                                          00069100
   707                   KB=1                                                           00069200
   708                   NPB=0                                                          00069300
   709                   KNA=1
   710                   KNB=1
   711                   YMAX=1.5D0                                                     00069400
   712               105 CONTINUE                                                       00069500
   713                   READ(5,15) IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,U0,V0,R0                      00069600
   714                   WRITE(6,16) IPN,NX,NY,XC,YC,XD,YD,U0,V0,R0                     00069700
   715                   IF(IPN.EQ.1)RA=R0                                              00070000
   716                   IF(IPN.EQ.2)RB=R0                                              00070100
   717                   XC=XC*RDX                                                      00070200
   718                   XD=XD*RDX                                                      00070300
   719                   YC=YC*RDY                                                      00070400
   720                   YD=YD*RDY                                                      00070500
   721                   YMAX=MAX(YMAX,YD+1.5D0)                                        00070600
   722                   IF(IPN.GE.3) GOTO 140
   723                   LPX=MAX0(NX,NXB,LPX)                                           00070800
   724                   LPY=MAX0(NY,NYB,LPY)                                           00070900
   725                   IF(NX.EQ.0)GOTO 126                                            00071000
   726                   XTE=1.0D0/NX                                                   00071100
   727                   YTE=1.0D0/NY                                                   00071200
   728                   Y=YTE*0.5D0                                                    00071300
   729               110 X=XTE*0.5D0                                                    00071400
   730               115 IF(X.GE.XC.AND.X.LE.XD.AND.Y.GE.YC.AND.Y.LE.YD)GOTO 120        00071500
   731                   GOTO 125                                                       00071600
   732               120 I=X+2.0D0                                                      00071700
   733                   J=Y+2.0D0                                                      00071800
   734                   IF(IFL(I,J).EQ.IOB)GOTO 125                                    00071900
   735                   GOTO (121,122),IPN                                             00072000
   736               121 PA(KA)=X                                                       00072100
   737                   PA(KA+1)=Y                                                     00072200
   738                   KA=KA+2                                                        00072300
   739                   IF(KA.GT.LPA)GOTO 130                                          00072400
   740                   NPA=NPA+1                                                      00072500
   741                   GOTO 124                                                       00072600
   742               122 PB(KB)=X                                                       00072700
   743                   PB(KB+1)=Y                                                     00072800
   744                   KB=KB+2                                                        00072900
   745                   IF(KB.GT.LPB)GOTO 131                                          00073000
   746                   NPB=NPB+1                                                      00073100
   747               124 IFL(I,J)=IFUL                                                  00073200
   748                   R(I,J)=R0                                                      00073300
   749                   IF(IFL(I+1,J).EQ.IBND)U(I,J)=U(I,J)*ROS(J)+U0*(1.0D0-ROS(J))   00073400
   750                   IF(IFL(I+1,J).NE.IBND.AND.IFL(I+1,J).NE.IOB)U(I,J)=U0          00073500
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                  ON1                      PAGE          17

  ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

   751                   IF(IFL(I-1,J).NE.IBND.AND.IFL(I-1,J).NE.IOB)U(I-1,J)=U0        00073600
   752                   IF(IFL(I,J-1).NE.IBND.AND.IFL(I,J-1).NE.IOB)V(I,J-1)=V0        00073700
   753                   IF(IFL(I,J+1).NE.IBND)V(I,J)=V0                                00073800
   754               125 X=X+XTE                                                        00073900
   755                   IF(X.LT.IBAR)GOTO 115                                          00074000
   756                   Y=Y+YTE                                                        00074100
   757                   IF(Y.LT.JBAR)GOTO 110                                          00074200
   758                   GOTO 105                                                       00074300
   759               126 IS=XC+2.0D0                                                    00074400
   760                   IE=XD+1.0D0
   761                   JS=YC+2.0D0                                                    00074600
   762                   JE=YD+1.0D0
   763                   DO 128 J=JS,JE                                                 00074800
   764                   DO 128 I=IS,IE                                                 00074900
   765                   IF(IFL(I,J).EQ.IOB) GOTO 128
   766                   IFL(I,J)=IFUL                                                  00075000
   767                   R(I,J)=R0                                                      00075100
   768                   IF(IFL(I+1,J).EQ.IBND)U(I,J)=U(I,J)*ROS(J)+U0*(1.0D0-ROS(J))   00075200
   769                   IF(IFL(I+1,J).NE.IBND.AND.IFL(I+1,J).NE.IOB)U(I,J)=U0          00075300
   770                   IF(IFL(I-1,J).NE.IBND.AND.IFL(I-1,J).NE.IOB)U(I-1,J)=U0        00075400
   771                   IF(IFL(I,J-1).NE.IBND.AND.IFL(I,J-1).NE.IOB)V(I,J-1)=V0        00075500
   772                   IF(IFL(I,J+1).NE.IBND)V(I,J)=V0                                00075600
   773               128 CONTINUE                                                       00075700
   774                   GOTO 105                                                       00075800
   775               130 WRITE(6,17) KA                                                 00075900
   776                   STOP ' ERROR (PA)'                                             00076000
   777               131 WRITE(6,18) KB                                                 00076100
   778                   STOP ' ERROR (PB)'                                             00076200
   779               132 WRITE(6,32) KS                                                 00076300
   780                   STOP ' ERROR (H)'                                              00076400
   781               140 CONTINUE                                                       00076500
   782                   IF(YC.LE.0.D0) STOP 'ERROR YC(IPN=3)'                          00076700
   783                   KS=IBAR+3                                                      00076800
   784                   IF(KS.GT.LPS)GOTO 132                                          00076900
   785                   DO 141 I=1,KS                                                  00077000
   786                   H(I)=YC-0.05D0                                                 00077100
   787               141 CONTINUE                                                       00077200
   788               149 WRITE(6,19) NPA,NPB                                            00077300
   789                   WRITE(6,10) IALL                                               00077400
   790                   YH=YC*DY
   791                   IF(XD.GE.0.0)RSQU=1.0/SQRT((RB-RA)/RB*SQRT(GX*GX+GY*GY)*YH)
   792                   GOTO 250                                                       00077600
   793             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00077700
   794             CCC   ｼﾖｳｶﾞｲﾌﾞﾂ ﾉ ｾﾂﾃｲ                                                 00077800
   795             CCC                                                                  00077900
   796               150 CONTINUE                                                       00078000
   797                   IF(L7.EQ.0)GOTO 160                                            00078100
   798                   NOBST=NOBST+1                                                  00078200
   799                   IF(NOBST.GT.LOBST) STOP 'ERROR (NOBST)'                        00078300
   800                   L5OB(NOBST)=L5                                                 00078400
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                   PAGE        18

   ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    801                  L60B(NOBST)=L6                                                         00078500
    802                  L70B(NOBST)=L7                                                         00078600
    803                  IL=L5+2                                                                00078700
    804                  IR=L6+1                                                                00078800
    805                  JTE=L7+1                                                               00078900
    806                  DO 155 J=2,JTE                                                         00079000
    807                  DO 155 I=IL,IR                                                         00079100
    808                  IOBST=IOBST+1                                                          00079200
    809              155 IFL(I,J)=IOB                                                           00079300
    810             CCC                                                                         00079400
    811             CCC    ﾘﾕｳﾆﾕｳ/ﾘﾕｳｼﾕﾂ ｷﾖｳｶｲ ﾊﾟﾗﾒ-ﾀ                                           00079500
    812             CCC                                                                         00079600
    813              160 XDIS=0.5D0/AMAXO(NXB,1)                                                00079700
    814                  YDIS=1.0D0/AMAXO(NYB,1)                                                00079800
    815                  NIN=NYB                                                                00079900
    816                  DO 161 J=2,JP1                                                         00080000
    817              161 COLS(J)=0.0                                                            00080100
    818                  DO 163 J=L1+2,L2+1                                                     00080200
    819                  UL(J)=ULL                                                              00080300
    820              163 RL(J)=RLL                                                              00080400
    821                  IF(ITYPEL.GE.8)READ(5,11)(RL(J),J=L1+2,L8+1)                           00080500
    822                  IF(ITYPEL.EQ.9)READ(5,11)(UL(J),J=L1+2,L2+1)                           00080600
    823                  DO 171 J=L3+2,L4+1                                                     00080700
    824              171 UR(J)=URR                                                              00080800
    825                  IF(ITYPER.EQ.9)READ(5,11)(UR(J),J=L3+2,L4+1)                           00080900
    826              180 CONTINUE                                                               00081000
    827                  IF(ITYPEL.GE.8) WRITE(6,36)(J,UL(J),J=L1+2,L2+1)                       00081100
    828                  IF(ITYPEL.EQ.9) WRITE(6,37)(J,RL(J),J=L1+2,L2+1)                       00081200
    829                  IF(ITYPER.EQ.9) WRITE(6,38)(J,UR(J),J=L3+2,L4+1)                       00081300
    830                  DO 190 J=1,JP2                                                         00081400
    831                  IF(J.GE.(L1+2).AND.J.LE.(L2+1))GOTO 184                                00081500
    832              182 IF(J.GE.(L3+2).AND.J.LE.(L4+1))GOTO 186                                00081600
    833                  GOTO 190                                                               00081700
    834              184 U(1,J)=UL(J)                                                           00081800
    835                  R(1,J)=RL(J)                                                           00081900
    836                  BCLT(J)=-1.0D0                                                         00082000
    837                  GOTO 182                                                               00082100
    838              186 U(IP1,J)=UR(J)                                                         00082200
    839                  BCRT(J)=-1.0D0                                                         00082300
    840                  IF(URR.NE.0.0.OR.ITYPER.EQ.0) GOTO 190
    841                  ROS(J)=0.0                                                             00082500
    842                  BCRT(J)=1.0D0                                                          00082600
    843              190 CONTINUE                                                               00082700
    844                  IF(IOBST.EQ.1) IOBST=100                                               00082800
    845                  IF(ITYPE.GT.0) GOTO 69
    846             C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *00083000
    847             CCC    ｹﾞ-ﾄ ﾉ ｿｳｻ                                                          00083100
    848             CCC                                                                         00083200
    849              200 CONTINUE                                                               00083300
    850                  DO 202 I=1,NG                                                          00083400
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                ON1                   PAGE        19

   ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    851                  IF(ABS(T-GT(I)).GT.1.0D-4)GOTO 202                                     00083500
    852                  L7=GO(I)*RDY+0.001D0                                                   00083600
    853                  IF(L7.LE.0)STOP 'DATA ERROR (GO) '                                     00083700
    854                  GOTO 203                                                               00083800
    855              202 CONTINUE                                                               00083900
    856              203 DO 204 K=1,IALL                                                        00084000
    857                  IF(I1(K).EQ.IOB)I1(K)=IEMP                                             00084100
    858              204 CONTINUE                                                               00084200
    859                  IF(L7.GE.JBAR) GOTO KRET
    860              210 IL=L5+2                                                                00084400
    861                  IR=L6+1                                                                00084500
    862                  JTS=L7+2                                                               00084600
    863                  JTE=JP1                                                                00084700
    864                  DO 212 J=JTS,JTE                                                       00084800
    865                  DO 212 I=IL,IR                                                         00084900
    866                  IGATE=IGATE-1                                                          00085000
    867                  IFL(I,J)=IOB                                                           00085100
    868              212 CONTINUE                                                               00085200
    869                  GOTO KRET
    870             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00085400
    871             CCC    ﾏ-ｶ- ﾉ ｶｽﾞ                                                          00085500
    872             CCC                                                                         00085600
    873              250 CONTINUE                                                               00085700
    874                  NPA2=NPA*2                                                             00085800
    875                  NPB2=NPB*2                                                             00085900
    876                  DO 252 J=2,JP1
    877                  DO 252 I=2,IP1
    878                  KF(I,J)=0
    879              252 CONTINUE
    880                  DO 254 J=2,JP1
    881                  DO 253 I=2,IP1
    882                  IF(IFL(I,J).EQ.IOB) KF(I,J)=-1
    883              253 CONTINUE
    884              254 CONTINUE
    885                  IF(NPA.EQ.0)GOTO 258                                                   00086500
    886                  DO 257 K=1,NPA                                                         00086600
    887                  I=PA(2*K-1)+2.0D0                                                      00086700
    888                  J=PA(2*K)+2.0D0                                                        00086800
    889                  KF(I,J)=KF(I,J)+1                                                      00086900
    890              257 CONTINUE                                                               00087000
    891              258 CONTINUE                                                               00087100
    892                  IF(NPB.EQ.0)GOTO 260                                                   00087200
    893                  DO 259 K=1,NPB                                                         00087300
    894                  I=PB(2*K-1)+2.0D0                                                      00087400
    895                  J=PB(2*K)+2.0D0                                                        00087500
    896                  KF(I,J)=KF(I,J)+100                                                    00087600
    897              259 CONTINUE                                                               00087700
    898              260 CONTINUE                                                               00087800
    899             CCC                                                                         00087900
    900             C          ﾓﾄﾞ                                                              00088000
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                      ON1                        PAGE          20

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

     901              CCC                                                                      00088100
     902                    DO 270 J=2,JP1                                                     00088200
     903                    DO 270 I=2,IP1                                                     00088300
     904                    IF(IFL(I,J).NE.IFUL.AND.IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 270                  00088400
     905                    IF(KF(I,J).EQ.0) GOTO 268                                          00088500
     906                    R(I,J)=(DFLOAT(KF(I,J)-KF(I,J)/100*100)*RA                         00088600
     907                   #            +DFLOAT(KF(I,J)/100)*RB)                               00088700
     908                   X    /DFLOAT(KF(I,J)-KF(I,J)/100*100+KF(I,J)/100)                   00088800
     909                    GOTO 270                                                           00088900
     910                268 R(I,J)=R(I,J-1)                                                    00089000
     911                270 CONTINUE                                                           00089100
     912              CCC                                                                      00089200
     913              CCC   SUR --> EMP                                                        00089300
     914              CCC                                                                      00089400
     915              CCC                                                                      00089500
     916              CCC   FUL --> SUR , SUR --> FUL                                          00089600
     917              CCC                                                                      00089700
     918                280 CONTINUE                                                           00089800
     919                    IF(XC.LT.0.D0) GOTO 299                                            00089900
     920                    DO 290 J=2,JP1                                                     00090000
     921                    DO 290 I=2,IP1                                                     00090100
     922                    IF(IFL(I,J).EQ.IOB)GOTO 290                                        00090200
     923                    JH=(H(I)+H(I+1))/2.0D0                                             00090300
     924                    IF(J-2-JH) 288,286,284                                             00090400
     925                284 IFL(I,J)=IEMP                                                      00090500
     926                    IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)U(I,J)=0.0                                   00090600
     927                    IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)U(I-1,J)=0.0                                 00090700
     928                    IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)V(I,J)=0.0                                   00090800
     929                    IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP)V(I,J-1)=0.0                                 00090900
     930                    GOTO 290                                                           00091000
     931                286 IFL(I,J)=ISUR                                                      00091100
     932                    GOTO 290                                                           00091200
     933                288 IFL(I,J)=IFUL                                                      00091300
     934                290 CONTINUE                                                           00091400
     935                299 CONTINUE                                                           00091500
     936              CCC                                                                      00091600
     937                    CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,3)                               00091700
     938                    CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,1)                               00091800
     939                    CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,2)                               00091900
     940                    CALL  BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,4)                              00092000
     941              C  *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *   *00092300
     942              CCC   ﾋﾖｳﾒﾝ ｱﾂﾘﾖｸ ﾉ ｾﾂﾃｲ                                                  00092400
     943              CCC                                                                      00092500
     944                300 CONTINUE                                                           00092600
     945                    DO 350 J=2,JP1                                                     00092700
     946                    DO 350 I=2,IP1                                                     00092800
     947                    IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 340                                       00092900
     948                    N=0                                                                00093000
     949                    IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP)N=N+1                                        00093100
     950                    IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP)N=N+2                                        00093200
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                      ON1                        PAGE          21

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

     951                    IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP)N=N+4                                        00093300
     952                    RSQ=1.0D0/SQRT(DX**2+((H(I+1)-H(I))*DY)**2)                        00093400
     953                    ACOS=DY*RSQ                                                        00093500
     954                    ASIN=(H(I+1)-H(I))*DY*RSQ                                          00093600
     955                    GOTO (305,315,310,325,335,320,335),N
     956                305 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     957                  1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     958                  2     -0.5*ACOS*(V(I,J-1)-V(I-1,J-1)+V(I,J)-V(I-1,J)))
     959                  3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))
     960                  4     -0.5*ASIN*(U(I,J+1)-U(I,J-1))))
     961                    GOTO 350
     962                310 PPP(I,J)=2.0D0*R(I,J)*VIS(I,J)*                                    00093800
     963                  1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))-ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J)))+         00093900
     964                  2 ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))-ASIN*(U(I,J)-U(I,J-1))))          00094000
     965                    GOTO 350                                                           00094100
     966                315 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     967                  1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     968                  2     -0.5*ACOS*(V(I+1,J)-V(I-1,J)))
     969                  3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J))
     970                  4     -0.5*ASIN*(U(I-1,J)+U(I,J)-U(I-1,J-1)-U(I,J-1))))
     971                    GOTO 350
     972                320 PPP(I,J)=2.0D0*R(I,J)*VIS(I,J)*                                    00094200
     973                  1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))-ACOS*(V(I+1,J)-V(I,J)))+         00094300
     974                  2  ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I,J-1))-ASIN*(U(I-1,J)-U(I-1,J-1))))     00094400
     975                    GOTO 350                                                           00094500
     976                325 PPP(I,J)=2.0*R(I,J)*VIS(I,J)*
     977                  1 (ASIN*RDX*(ASIN*(U(I,J)-U(I-1,J))
     978                  2     -0.5*ACOS*(V(I+1,J)-V(I,J)+V(I+1,J-1)-V(I,J-1)))
     979                  3 +ACOS*RDY*(ACOS*(V(I,J)-V(I-1,J))
     980                  4     -0.5*ASIN*(U(I-1,J+1)-U(I-1,J-1))))
     981                    GOTO 350
     982                335 PPP(I,J)=0.0                                                       00094600
     983                    GOTO 350                                                           00094700
     984                340 IF(ICYCLE.NE.0)GOTO 350                                            00094800
     985                    IF(ITYPE.NE.0.AND.URR.EQ.0.0)GOTO 350                              00094900
     986                    IF(IFL(I,J).NE.IFUL) GOTO 350                                      00095000
     987                      PPP(I,J)=-GY*DY*(0.5D0*(H(I+1)+H(I))-J+1.5D0)*R(I,J)             00095100
     988                350 CONTINUE                                                           00095200
     989              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00095300
     990              C  SURFACE PRESSURE INTERPOLATION                                        00095400
     991              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00095500
     992                    IF(XC.LT.0.0) GOTO 400
     993                    DO 390 J=2,JP1                                                     00095600
     994                    DO 390 I=2,IP1                                                     00095700
     995                    IF(IFL(I,J).NE.ISUR)GOTO 390                                       00095800
     996                    NS=I-1                                                             00095900
     997                     HS(NS)=1./(0.5D0*(H(I)+H(I+1))-DFLOAT(J)+2.5D0)                   00096000
     998                    IF(HS(NS).LE.2.0D0/3.0D0)HS(NS)=2.0D0/3.0D0                        00096100
     999                    PPP(I,J)=HS(NS)*(PPP(I,J)-PPP(I,J-1))+PPP(I,J-1)                   00096200
    1000                390 CONTINUE                                                           00096300
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                 ON1                      PAGE          22

  ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

   1001              C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *  *00096400
   1002              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00096500
   1003              CCC   ｼｭﾂﾘｮｸ ｼｮﾘ                                                      00096600
   1004              CCC                                                                   00096700
   1005                400 CONTINUE                                                        00096800
   1006                    IF(ICYCLE.EQ.0.AND.IPN.EQ.3) GOTO 410
   1007                    IF(ABS(TWPRT-T).GT.1.0D-4)GOTO 420                              00096900
   1008              CCC                                                                   00097000
   1009              C     PRINT OUT                                                       00097100
   1010              CCC                                                                   00097200
   1011                    NUMPR=NUMPR+1                                                   00097300
   1012                    TWPRT=TWPRT+TPRT                                                00097400
   1013                410 WRITE(6,1)                                                      00097500
   1014                    WRITE(6,2) LNAME                                                00097600
   1015                    WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE                                 00097700
   1016                    WRITE(6,22)                                                     00097800
   1017                    DO 415 JJ=2,JP1
   1018                    DO 414 I=2,IP1
   1019                    J=JP2+1-JJ                                                      00098100
   1020                     DIJ=RDX*(U(I,J)-U(I-1,J))+RDY*(V(I,J)-V(I,J-1))                00098300
   1021                    UIJ=0.5D0*(U(I,J)+U(I-1,J))                                     00098400
   1022                    VIJ=0.5D0*(V(I,J)+V(I,J-1))                                     00098500
   1023                    VORIJ=RDX*(V(I+1,J)-V(I,J))-RDY*(U(I,J+1)-U(I,J))               00098600
   1024                    WRITE(6,23) I,J,FL(IFL(I,J)),U(I,J),V(I,J),PPP(I,J),DIJ,        00098700
   1025                   # UIJ,VIJ,R(I,J),VIS(I,J),VORIJ                                  00098800
   1026                414 CONTINUE                                                        00098900
   1027                415 CONTINUE                                                        00099000
   1028                    WRITE(6,22)                                                     00099100
   1029                420 IF(ICYCLE.EQ.0) GOTO 421                                        00099200
   1030                    IF(ABS(TWT-T).GT.1.0D-4) GOTO 450                               00099300
   1031              CCC                                                                   00099400
   1032              C     TAPE  DUMP                                                      00099500
   1033              CCC                                                                   00099600
   1034                    NUMTD=NUMTD+1                                                   00099700
   1035                    TWT=TWT+TT                                                      00099800
   1036                421 CONTINUE                                                        00099900
   1037                    WRITE(6,24) NUMTD,T,ICYCLE                                      00100000
   1038                    WRITE(IW)NAME,IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,   00100100
   1039                   1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13, 00100200
   1040                   2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B,L60B,L70B,                 00100300
   1041                   3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE,LNAME,               00100400
   1042                   4 (I1(I),I=1,IALL),(I2(I),I=1,IALL),BO,                          00100500
   1043                   #  BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT,BCRT,ROS,VNU,EPSD,BETA,GX,GY,            00100600
   1044                   1 ULL,URR,RLL,UL,UR,RL,XC,XD,XDIS,XTE,YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS,00100700
   1045                   2 XDISS,YFIRS,COLSS,GT,GO,DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,00100800
   1046                   3 RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                    00100900
   1047                   4 (A1(I),I=1,IALL),(A2(I),I=1,IALL),(A3(I),I=1,IALL),            00101000
   1048                   5 (A4(I),I=1,IALL), (A5(I),I=1,IALL),                            00101100
   1049                   6 (A6(I),I=1,IALL),(A7(I),I=1,IALL),                             00101200
   1050                   7 (PA(I),I=1,NPA2),(PB(I),I=1,NPB2),(H(I),I=1,IBAR+3),           00101300
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                 ON1                      PAGE          23

  ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

   1051                   8 (HS(I),I=1,IBAR),RA,RB,RSQU                                    00101400
   1052              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00101500
   1053              C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *  *00101600
   1054              C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00101700
   1055                450 CONTINUE                                                        00101800
   1056                    IXP=IXP+1                                                       00101900
   1057                    IF(IXP.EQ.IXPR)IXP=1                                            00102000
   1058                    IF(IXP.NE.1)GOTO 459                                            00102100
   1059                    IF(ICYCLE.EQ.0.AND.IPN.GE.7) GOTO 459
   1060                    GOTO (453,453,454,459),IPR                                      00102200
   1061              CCC                                                                   00102300
   1062                453 CONTINUE                                                        00102400
   1063                    IF(XC.LT.0.0) GOTO 454
   1064                    WRITE(6,1)                                                      00102500
   1065                    WRITE(6,2) LNAME                                                00102600
   1066                    WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE                                 00102700
   1067                    WRITE(6,34) (H(I),I=1,IBAR+3)                                   00102800
   1068              CCC                                                                   00102900
   1069                454 CONTINUE                                                        00103000
   1070                    WRITE(6,1)                                                      00103100
   1071                    WRITE(6,2) LNAME                                                00103200
   1072                    WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE                                 00103300
   1073                    DO 457 KK=1,50                                                  00103400
   1074                    IS=30*(KK-1)+2                                                  00103500
   1075                    IE=MIN0(IP1,IS+29)                                              00103600
   1076                    DO 456 JJ=2,JP1                                                 00103700
   1077                    J=JP2+1-JJ                                                      00103800
   1078                    WRITE(6,27) J,(KF(I,J),I=IS,IE)                                 00103900
   1079                    WRITE(6,41) (FL(IFL(I,J)),I=IS,IE)                              00104000
   1080                456 CONTINUE                                                        00104100
   1081                    WRITE(6,28)                                                     00104200
   1082                    IF(IE.EQ.IP1)GOTO 458                                           00104300
   1083                457 CONTINUE                                                        00104400
   1084              CCC                                                                   00104500
   1085                458 CONTINUE                                                        00104600
   1086                    CALL  LPLT2(LPX,LPY,NPA,PA,NPB,PB)                              00104700
   1087                459 CONTINUE                                                        00104800
   1088                    WRITE(6,2) LNAME                                                00104900
   1089                    WRITE(6,21) NAME,T,ICYCLE,IDATE                                 00105000
   1090                    IF(ITYPE.NE.0)WRITE(6,19)NPA,NPB                                00105100
   1091                    IF(XD.GE.0.0)CALL UF(U,V,PU,NPB2,1,IP2,JP2,T,XD,PSQU,YC,DX)
   1092                    CALL PTIME(CTL)
   1093                    CTIME=CTL-CT1
   1094                    CTSL=CTL-CTS
   1095                    WRITE(6,20) CTSL*3600.0,CTIME*3600.0
   1096                    IF(TWFIN.LE.T) GOTO 950                                         00105700
   1097                    CTS=CTL
   1098              C     IF(ITL.GE.LCTIME)STOP 'TIME OVER'
   1099                    ICYCLE=ICYCLE+1                                                 00106000
   1100                    T=TO+DT*DFLOAT(ICYCLE)                                          00106100
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                      ON1                     PAGE          26

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1101                    GOTO 500                                                            00106200
    1102             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00106300
    1103             C   *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *    *   *00106400
    1104             CCC                                                                        00106500
    1105             C   TAPE RESTART                                                           00106600
    1106             CCC                                                                        00106700
    1107               460 CONTINUE                                                             00106800
    1108                    WRITE(6,25) IP2,JP2                                                 00106900
    1109                    READ(5,29) TAPE,TWFIN,IPR,IW,IRF,TDT,TPT
    1110                    IF(IPR.LT.1.OR.IPR.GT.4) IPR=3                                      00107100
    1111                    WRITE(6,40) TAPE,TWFIN,IPR,IW,IRF
    1112                    IF(TAPE.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TAPE)'                            00107400
    1113                    IF(TWFIN.LE.0.0) STOP 'DATA ERROR (TWFIN)'                          00107500
    1114                    REWIND IRF
    1115               465 READ(IRF,ERR=990)
    1116                  * NNAME,IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IAND,IFUL,ISUR,IEMP,IOB,               00107800
    1117                  1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,    00107900
    1118                  2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NOBST,L50B,L60B,L70B,                      00108000
    1119                  3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE,LNAME,                    00108100
    1120                  4 (I1(I),I=1,IALL),(I2(I),I=1,IALL),HO,                               00108200
    1121                  #  BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT,BCRT,ROS,VNU,EPSD,BETA,GX,GY,                 00108300
    1122                  1 ULL,URR,RLL,UL,UR,RL,XC,XD,XDIS,XTE,YC,YD,YDIS,YTE,U0,V0,R0,COLS,00108400
    1123                  2 XDISS,YFIRS,COLSS,GT,GO,DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,00108500
    1124                  3 RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,                         00108600
    1125                  4 (A1(I),I=1,IALL),(A2(I),I=1,IALL),(A3(I),I=1,IALL),                00108700
    1126                  5 (A4(I),I=1,IALL), (A5(I),I=1,IALL),                                 00108800
    1127                  6 (A6(I),I=1,IALL),(A7(I),I=1,IALL),                                  00108900
    1128                  7 (PA(I),I=1,NPA2),(PB(I),I=1,NPB2),(H(I),I=1,IBAR+3),               00109000
    1129                  8 (HS(I),I=1,IBAR),RA,RB,RSQU                                         00109100
    1130                    IF(T.GE.TAPE)GOTO 466                                               00109200
    1131                    IF(ABS(T-TAPE).GT.1.0D-4)GOTO 465                                   00109300
    1132               466 CONTINUE                                                             00109400
    1133                    NPA=NPA2/2                                                          00109600
    1134                    NPB=NPB2/2                                                          00109700
    1135                    IF(TDT.GT.0.0) TT=TDT
    1136                    IF(TPT.GT.0.0) TPRT=TPT
    1137                    WRITE(6,26) TDT,TPT                                                 00110000
    1138                    WRITE(6,30) NUMTD                                                   00110100
    1139                    WRITE(6,2) NNAME                                                    00110200
    1140                    WRITE(6,39) IDATE                                                   00110300
    1141                    WRITE(6,5)IBAR,JBAR,DX,DY,DT,B0                                     00110400
    1142                    WRITE(6,6) BCB,BCL,BCT,BCR,VNU,EPSD,GX,GY                           00110500
    1143                    WRITE(6,7) T,TWPRT,TWT,TWFIN,XPR,IPR,IW                             00110600
    1144                    WRITE(6,9) ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,          00110700
    1145                  # L10,L11,L12,L13,NXB,NYB,ULL,URR,RLL                                 00110800
    1146                    IF(ITYPE.GE.0)GOTO 467                                              00110900
    1147                    WRITE(6,12) NG                                                      00111000
    1148                    WRITE(6,13) (GT(I),GO(I),I=1,NG)                                    00111100
    1149               467 WRITE(6,19) NPA,NPB                                                  00111200
    1150                    IXP=IXP+1                                                           00111300
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                      ON1                     PAGE          25

   ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1151                    IF(IXP.EQ.IXPR)IXP=1                                                00111400
    1152                    CALL DATIM(IDATE,CTM)
    1153                    WRITE(6,39) IDATE
    1154                    GOTO 459                                                            00111700
    1155             C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00111800
    1156             CCC                                                                        00111900
    1157             C      UTIL,VTIL CALCULATION                                               00112000
    1158             CCC                                                                        00112100
    1159               500 CONTINUE                                                             00112200
    1160             CCC          PREPARE FOR UTIL / VTIL CALCULATION                           00112300
    1161             CCC                                                                        00112400
    1162                    DO 510 J=2,JP1                                                      00112500
    1163                     DO 510 I=2,IP1                                                     00112600
    1164                        UTIL(I,J)=U(I,J)                                                00112700
    1165               510      VTIL(I,J)=V(I,J)                                                00112800
    1166                    IF(VNU.GT.0.0) GOTO 515
    1167                    CALL VISCO(IP2,JP2,IFL,U,V,VIS)
    1168                    CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,5)
    1169               515 CONTINUE
    1170                    DO 535 J=2,JP1                                                      00113000
    1171                    DO 530 I=2,IP1                                                      00113100
    1172                    IF(IFL(I,J).GE.IEMP)GOTO 530                                        00113200
    1173                    IF(I.EQ.IP1.OR.IFL(I+1,J).GE.IEMP)GOTO 525                          00113300
    1174                    ZIP=U(I,J)*(R(I,J)*U(I-1,J)-R(I+1,J)*U(I+1,J))                      00113400
    1175                    AV= V(I,J-1) + V(I+1,J-1)                                           00113500
    1176                    IF( AV.LT.0.D0 ) GOTO 521                                           00113600
    1177                    RUVBR= 0.25D0*(R(I,J-1)+R(I+1,J-1))*U(I,J-1)*AV                     00113700
    1178                    GOTO 522                                                            00113800
    1179               521 RUVBR= 0.25D0*(R(I,J)+R(I+1,J))*U(I,J)*AV                            00113900
    1180               522 AV= V(I,J) + V(I+1,J)                                                00114000
    1181                    IF( AV.LT.0.D0 ) GOTO 523                                           00114100
    1182                    RUVTR= 0.25D0*(R(I,J)+R(I+1,J))*U(I,J)*AV                           00114200
    1183                    GOTO 524                                                            00114300
    1184               523 RUVTR= 0.25D0*(R(I,J+1)+R(I+1,J+1))*U(I,J+1)*AV                      00114400
    1185               524 CONTINUE                                                             00114500
    1186                    ROH=0.5D0*(R(I,J)+R(I+1,J))                                         00114600
    1187                    UTIL(I,J)=U(I,J)+DT*GX+DT*(RDX*(ZIP+PPP(I,J)-PPP(I+1,J))/ROH        00114700
    1188                  1 +RDY*(RUVBR-RUVTR)/ROH+2.0D0*RDX2*(VIS(I+1,J)*(U(I+1,J)-U(I,J))     00114800
    1189                  2      -VIS(I,J)*(U(I,J)-U(I-1,J)))                                   00114900
    1190                  3 +0.25D0*RDY*(VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VIS(I,J+1)+VIS(I+1,J+1))          00115000
    1191                  4       *(RDY*(U(I,J+1)-U(I,J))+RDX*(V(I+1,J)-V(I,J)))                00115100
    1192                  5  -0.25D0*RDY*(VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I+1,J-1))         00115200
    1193                  6     *(RDY*(U(I,J)-U(I,J-1))+RDX*(V(I+1,J-1)-V(I,J-1))))             00115300
    1194               525 IF(J.EQ.JP1.OR.IFL(I,J+1).GE.IEMP)GOTO 530                           00115400
    1195                    ZIP=V(I,J)*(R(I,J)*V(I,J-1)-R(I,J+1)*V(I,J+1))                      00115500
    1196                    AV= V(I-1,J) + V(I,J)                                               00115600
    1197                    IF( AV.LT.0.D0 ) GOTO 526                                           00115700
    1198                    RUVTL= 0.25D0*(R(I-1,J)+R(I,J))*U(I-1,J)*AV                         00115800
    1199                    GOTO 527                                                            00115900
    1200               526 RUVTL= 0.25D0*(R(I-1,J+1)+R(I,J+1))*U(I-1,J+1)*AV                    00116000
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS              ON1                        PAGE          26

   ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1201          527 AV= V(I+1,J) + V(I,J)                                                   00116100
    1202              IF( AV.LT.0.D0 ) GOTO 528                                               00116200
    1203              RUVTR= 0.25D0*(R(I,J)+R(I+1,J))*U(I,J)*AV                               00116300
    1204              GOTO 529                                                                00116400
    1205          528 RUVTR= 0.25D0*(R(I,J+1)+R(I+1,J+1))*U(I,J+1)*AV                         00116500
    1206          529 CONTINUE                                                                00116600
    1207              ROH=0.5D0*(R(I,J)+R(I,J+1))                                             00116700
    1208              VTIL(I,J)=V(I,J)+DT*GY+DT*(RDY*(ZIP+PPP(I,J)-PPP(I,J+1))/ROH            00116800
    1209             1 +RDX*(RUVTL-RUVTR)/ROH+2.0D0*RDY2*(VIS(I,J+1)*(V(I,J+1)-V(I,J))        00116900
    1210             2    -VIS(I,J)*(V(I,J)-V(I,J-1)))                                        00117000
    1211             3+0.25D0*RDY*((VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VIS(I+1,J+1)+VIS(I,J+1))              00117100
    1212             4     *(RDY*(U(I,J+1)-U(I,J))+RDX*(V(I+1,J)-V(I,J)))                     00117200
    1213             5      -(VIS(I,J)+VIS(I,J+1)+VIS(I-1,J+1)+VIS(I-1,J))                    00117300
    1214             6       *(RDY*(U(I-1,J+1)-U(I-1,J))+RDX*(V(I,J)-V(I-1,J)))))             00117400
    1215          530 CONTINUE                                                                00117500
    1216          535 CONTINUE                                                                00117600
    1217              DO 545 J=2,JP1                                                          00117700
    1218              DO 545 I=2,IP1                                                          00117800
    1219              U(I,J)=UTIL(I,J)                                                        00117900
    1220          545 V(I,J)=VTIL(I,J)                                                        00118000
    1221        C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00118100
    1222        C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00118200
    1223        CCC                                                                           00118300
    1224        C  P,U,V  CALCULATION (ITERATION)                                             00118400
    1225        CCC                                                                           00118500
    1226        C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00118600
    1227              IND=1                                                                   00118700
    1228              ITERD=0                                                                 00118800
    1229          555 CONTINUE                                                                00118900
    1230        C   BOUNDARY CONDITION (PERPENDICULAR TO THE BOUNDARY)                        00119000
    1231              DO 556 J=2,JP1                                                          00119100
    1232              U(1,J)=UL(J)                                                            00119200
    1233              U(IP1,J)=UR(J)*ROS(J)+U(IP1-1,J)*(1.0D0-ROS(J))                         00119300
    1234          556 CONTINUE                                                                00119400
    1235              DO 557 I=2,IP1                                                          00119500
    1236              V(I,1)=0.                                                               00119600
    1237              V(I,JP1)=0.                                                             00119700
    1238          557 CONTINUE                                                                00119800
    1239              CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,2)                                    00119900
    1240        CC                                                                            00120000
    1241              IF(IND.EQ.0) GOTO 580                                                   00120100
    1242              IND=0                                                                   00120200
    1243              ITERD=ITERD+1                                                           00120300
    1244               DD=0.0                                                                 00120400
    1245              DO 560 J=2,JP1                                                          00120500
    1246              DO 560 I=2,IP1                                                          00120600
    1247              IF(IFL(I,J).NE.IFUL) GOTO 560                                           00120700
    1248              DIJ=RDX*(U(I,J)-U(I-1,J))+RDY*(V(I,J)-V(I,J-1))                         00120800
    1249              UIJ=0.5*(U(I,J)+U(I-1,J))
    1250              VIJ=0.5*(V(I,J)+V(I,J-1))


STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS              ON1                        PAGE          27

   ALT #        C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1251              SQUV=SQRT(UIJ*UIJ+VIJ*VIJ)
    1252              DP=BETA*DIJ                                                             00120900
    1253              IF(SQUV.EQ.0.0) GOTO 560
    1254              DIJ=DIJ/SQUV
    1255              IF(ABS(DIJ).LE.DD) GOTO 559                                             00121000
    1256              DD=ABS(DIJ)                                                             00121100
    1257              II=I                                                                    00121200
    1258              JJ=J                                                                    00121300
    1259          559 CONTINUE                                                                00121400
    1260              IF(ABS(DIJ).LE.EPSD) GOTO 560                                           00121500
    1261              IND=1                                                                   00121600
    1262              PPP(I,J)=PPP(I,J)-DP                                                    00121700
    1263              U(I,J)=U(I,J)-DTODX*DP                                                  00121800
    1264              U(I-1,J)=U(I-1,J)+DTODX*DP                                              00121900
    1265              V(I,J)=V(I,J)-DTODY*DP                                                  00122000
    1266              V(I,J-1)=V(I,J-1)+DTODY*DP                                              00122100
    1267          560 CONTINUE                                                                00122200
    1268              IF(IPN.LE.4.OR.IPN.EQ.7) WRITE(6,31) T,ICYCLE,ITERD,DD,II,JJ
    1269              IF(ITERD.GT.1000) STOP 'SLOW CONVERGENCE (ITERD>1000)'
    1270              GOTO 555                                                                00122500
    1271          580 CONTINUE                                                                00122600
    1272              WRITE(6,31) T,ICYCLE,ITERD,DD,II,JJ                                     00122700
    1273          600 CONTINUE                                                                00122800
    1274              CALL BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,3)                                    00123000
    1275              CALL  BNDARY(IP2,JP2,IFL,U,V,R,VIS,1)                                   00122900
    1276        CCC                                                                           00123100
    1277        C700  MOVE & PACK MARKER PARTICLES                                            00123200
    1278        CCC                                                                           00123300
    1279          700 CONTINUE                                                                00123400
    1280              IF(NPA.NE.0) CALL MARKER(IP2,JP2,IFL,U,V,NPA,KNA,PA)
    1281              IF(ITYPEL.EQ.0)GOTO 800                                                 00123700
    1282              IF(L8.EQ.L2) GOTO 800                                                   00123800
    1283              DO 739 K=L8+2,L2+1                                                      00123900
    1284          715 X=UL(K)*RDX*(T+DT)-XDIS*(2.0D0*COLS(K)+1.0D0)                           00124000
    1285              IF(X.LT.0.0)GOTO 739                                                    00124100
    1286          720 COLS(K)=COLS(K)+1.0D0                                                   00124200
    1287              Y=0.5*YDIS+DFLOAT(K-2)
    1288              NPNA=NPA+NIN                                                            00124400
    1289          725 PA(KNA)=X                                                               00124500
    1290              PA(KNA+1)=Y                                                             00124600
    1291              KNA=KNA+2                                                               00124700
    1292              NPA=NPA+1                                                               00124800
    1293              I=X+2.0D0                                                               00124900
    1294              J=Y+2.0D0                                                               00125000
    1295              Y=Y+YDIS                                                                00125100
    1296              IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 730                                            00125200
    1297              IFL(I,J)=ISUR                                                           00125300
    1298              U(I,J)=UL(J)                                                            00125400
    1299              R(I,J)=RL(J)                                                            00125500
    1300          730 IF(KNA.GT.LPA)GOTO 130                                                  00125600
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                 ON1                   PAGE          28

    ALT #      C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1301                IF(NPA.LT.NPNA)GOTO 725                                              00125700
    1302                GOTO 715                                                             00125800
    1303            739 CONTINUE                                                             00125900
    1304            740 CONTINUE                                                             00126000
    1305            800 CONTINUE
    1306                IF(NPB.NE.0) CALL MARKER(IP2,JP2,IFL,U,V,NPB,KNB,PB)
    1307                IF(ITYPEL.LE.2) GOTO 840
    1308                DO 839 K=L1+2,L8+1                                                   00126400
    1309            815 X=UL(K)*RDX*(T+DT)-XDIS*(2.0D0*COLS(K)+1.0D0)                        00126500
    1310                IF(X.LT.0.0)GOTO 839                                                 00126600
    1311            820 COLS(K)=COLS(K)+1.0D0                                                00126700
    1312                Y=0.5*YDIS+DFLOAT(K-2)
    1313                NPNB=NPB+NIN                                                         00126900
    1314            825 PB(KNB)=X                                                            00127000
    1315                PB(KNB+1)=Y                                                          00127100
    1316                KNB=KNB+2                                                            00127200
    1317                NPB=NPB+1                                                            00127300
    1318                I=X+2.0D0                                                            00127400
    1319                J=Y+2.0D0                                                            00127500
    1320                Y=Y+YDIS                                                             00127600
    1321                IF(IFL(I,J).NE.IEMP)GOTO 330                                         00127700
    1322                IFL(I,J)=ISUR                                                        00127800
    1323                U(I,J)=UL(J)                                                         00127900
    1324                R(I,J)=RL(J)                                                         00128000
    1325            830 IF(KNB.GT.LPB)GOTO 131                                               00128100
    1326                IF(NPB.LT.NPNB)GOTO 825                                              00128200
    1327                GOTO 815                                                             00128300
    1328            839 CONTINUE                                                             00128400
    1329            840 CONTINUE                                                             00128500
    1330                IF(XC.LT.0.D0) GOTO 900                                              00128600
    1331                DO 850 I=2,IBAR+2                                                    00128700
    1332                JR=H(I)+1.5D0                                                        00128800
    1333                HPY=JR-0.5-H(I)                                                      00128900
    1334                HMY=1.0-HPY                                                          00129000
    1335                UK=0.5D0*(HMY*U(I-1,JR+1)+HPY*U(I-1,JR))                             00129100
    1336                JD=H(I)+2.0D0                                                        00129200
    1337                HPY=JD-1.0-H(I)                                                      00129300
    1338                HMY=1.0-HPY                                                          00129400
    1339                VK=0.25D0*(HMY*(V(I-1,JD)+V(I,JD))                                   00129500
    1340              #  +HPY*(V(I-1,JD-1)+V(I,JD-1)))                                       00129600
    1341                HD(I)=H(I)+(VK*DT-UK*DTODX*0.5D0*(H(I+1)-H(I-1))*DY)*RDY             00129700
    1342            850 CONTINUE                                                             00129800
    1343                DO 860 I=2,IBAR+2                                                    00129900
    1344            860 H(I)=HD(I)                                                           00130000
    1345                H(1)=H(3)                                                            00130100
    1346                H(IBAR+3)=H(IBAR+1)                                                  00130200
    1347            900 IF(ITYPE.GE.0)GOTO 250                                               00130300
    1348                ASSIGN 250 TO KRET                                                   00130400
    1349                GOTO 200                                                             00130500
    1350            C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *00130600
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                 ON1                   PAGE          29

    ALT #      C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

    1351            950 CONTINUE                                                         00130700
    1352                ENDFILE IW                                                       00130800
    1353                RETURN                                                           00130900
    1354            990 STOP ' READ ERROR (IRF)'
    1355                END                                                              00131100
    1356                SUBROUTINE UF(U,V,XP,NP2,IP,IP2,JP2,T,XS,RSQU,H,DX)
    1357                PARAMETER LPA=12000,LPB=12000
    1358                PARAMETER LXP=LPA
    1359                REAL*8 U(IP2,JP2),V(IP2,JP2),T,XS,RSQU,H,DX
    1360                DIMENSION XP(LXP)
    1361                IF(H.LE.0.0.OR.RSQU.EQ.0.0) RETURN
    1362                KK=0                                                             00131500
    1363                GOTO (1000,2000),IP                                              00131600
    1364           1000 CONTINUE                                                         00131700
    1365                C=1.0                                                            00131800
    1366                XX=0.0                                                           00131900
    1367                GOTO 3000                                                        00132000
    1368           2000 CONTINUE                                                         00132100
    1369                C=-1.0                                                           00132200
    1370                XX=10000.0                                                       00132300
    1371           3000 CONTINUE                                                         00132400
    1372                 DO 150 K = 1,NP2,2                                              00132500
    1373                  IF(IFIX(XP(K+1)))150,105,150                                   00132600
    1374            105  IF(C*(XX-XP(K)))110,150,150                                     00132700
    1375            110 KK=(K+1)/2                                                       00132800
    1376                XX=XP(K)                                                         00132900
    1377            150 CONTINUE                                                         00133000
    1378                IF(KK.EQ.0)GOTO 200                                              00133100
    1379                X0=XP(2*KK-1)                                                    00133200
    1380                Y0=XP(2*KK)                                                      00133300
    1381                XX=X0+1.0                                                        00133400
    1382                YY=Y0+1.0                                                        00133500
    1383                II=XX+1.0001                                                     00133600
    1384                JJ=YY+1.0001                                                     00133700
    1385                UU=(XX-FLOAT(II-1))*U(II,JJ)+(FLOAT(II)-XX)*U(II-1,JJ)           00133800
    1386                UU0=UU*RSQU                                                      00133900
    1387                VV=(YY-FLOAT(JJ-1))*V(II,JJ)+(FLOAT(JJ)-YY)*V(II,JJ-1)           00134000
    1388                X0=X0-XS                                                         00134100
    1389                XX0=X0*DX/H                                                      00134200
    1390                TT0=T/(H*RSQU)                                                   00134300
    1391                WRITE(6,100) T,UU,VV,X0,Y0,II,JJ,KK,TT0,UU0,XX0                  00134400
    1392            100 FORMAT('  T=',F8.3,'  UU=',F8.3,'  VV=',F8.3,                    00134500
    1393              # '  X0=',F8.3,'  Y0=',F8.3,'  II=',I3,'  JJ=',I3,                 00134600
    1394              # '  KK=',I4,'  TT0=',F8.3,'  UU0=',F8.4,'  XX0=',F8.3)            00134700
    1395                IF(T.EQ.0.D0) XS=X0                                              00134800
    1396                RETURN                                                           00134900
    1397            200 WRITE(6,101) T                                                   00135000
    1398            101 FORMAT('   T=',1PE12.4,'   KK= 0')                               00135100
    1399                RETURN                                                           00135200
    1400                END                                                              00135300
```

```
STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                  ON1                         PAGE          30

      ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R . C   F I L E

       1401                      SUBROUTINE VISCO (IP2,JP2,IFL,U,V,VIS)
       1402             C        SMAGORINSKY-DEARDORFF MODEL (SUBGRID SCALE EDDY COEFFICIENT)
       1403                      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
       1404                      PARAMETER MI=70,MJ=15,LB=10,MG=50
       1405                      PARAMETER LDM=MI*MJ,LPS=MI+3
       1406                      COMMON/IC/NAME(18),IBAR,JBAR,IP1,JP1,IALL,IBND,IFUL,ISUR,IEMP,IOH,
       1407                     1 ITYPE,ITYPEL,ITYPER,L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,
       1408                     2 NXB,NYB,NG,NIN,NPA2,NPB2,NORST,L50B(LB),L60B(LB),L70B(LB),
       1409                     3 ICYCLE,NUMTD,NUMPR,IXPR,IXP,LPX,LPY,IDATE(2),LNAME(10),
       1410                     4 I1(LDM),I2(LDM)
       1411                      COMMON/RC/TAPE,BC,BCB,BCL,BCT,BCR,BCLT(MJ),BCRT(MJ),ROS(MJ),VNU,
       1412                     1 EPSD,BETA,GX,GY,ULL,URR,RLL,UL(MJ),UR(MJ),RL(MJ),XC,XD,XDIS,XTE,
       1413                     2 YC,YD,YDIS,YTE,UO,VO,RO,COLS(MJ),XDISS,YFIRS,COLSS,GT(MG),GO(MG),
       1414                     3 DX,DY,DT,DTODX,DTODY,DXODY,DYODX,RDT,RDX,RDXDY,RDX2,RDY,RDY2,
       1415                     4 TO,T,TWPRT,TWT,TPRT,TT,
       1416                     5 A1(LDM),A2(LDM),A3(LDM),A4(LDM),A5(LDM),
       1417                     6 A6(LDM),A7(LDM),H(LPS),RA,RB
       1418                      DIMENSION IFL(IP2,JP2),U(IP2,JP2),V(IP2,JP2),VIS(IP2,JP2)
       1419                      C=0.1*DX*DY
       1420                      DO 100 J=2,JP1
       1421                      DO 100 I=2,IP1
       1422                      IF(IFL(I,J).NE.IFUL)GOTO 100
       1423                      VIS(I,J)=C*SQRT(2.0*RDX2*(U(I,J)-U(I-1,J))**2
       1424                     1               +2.0*RDY2*(V(I,J)-V(I,J-1))**2
       1425                     2  +0.25*(((V(I+1,J)-V(I,J))*RDX+(U(I,J+1)-U(I,J))*RDY)**2
       1426                     3        +((V(I,J)-V(I-1,J))*RDX+(U(I-1,J+1)-U(I-1,J))*RDY)**2
       1427                     4        +((V(I,J-1)-V(I-1,J-1))*RDX+(U(I-1,J)-U(I-1,J-1))*RDY)**2
       1428                     5        +((V(I+1,J-1)-V(I,J-1))*RDX+(U(I,J)-U(I,J-1))*RDY)**2))
       1429                  100 CONTINUE
       1430                      DO 200 J=2,JP1
       1431                      DO 200 I=2,IP1
       1432                      IF(IFL(I,J).NE.ISUR) GOTO 200
       1433                      N=0
       1434                      IF(IFL(I+1,J).EQ.IEMP) N=N+1
       1435                      IF(IFL(I,J+1).EQ.IEMP) N=N+2
       1436                      IF(IFL(I-1,J).EQ.IEMP) N=N+4
       1437                      IF(IFL(I,J-1).EQ.IEMP) N=N+8
       1438                      GOTO(105,110,115,120,125,130,135,140,145,150,105,160,140,120,200)
       1439                     * ,N
       1440                  105 VIS(I,J)=VIS(I-1,J)
       1441                      GOTO 200
       1442                  110 VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
       1443                      GOTO 200
       1444                  115 VIS(I,J)=VIS(I-1,J-1)
       1445                      GOTO 200
       1446                  120 VIS(I,J)=VIS(I+1,J)
       1447                      GOTO 200
       1448                  125 VIS(I,J)=(VIS(I,J+1)+VIS(I,J-1))/2
       1449                      GOTO 200
       1450                  130 VIS(I,J)=VIS(I+1,J-1)


STAR C (*C) FILE EDITOR MAP - NEW *C FILE CONTENTS                  ON1                         PAGE          31

      ALT #       C O N T E N T S   O F   T H E   C H A N G E S   O N   T H E   N E W   S T A R   C   F I L E

       1451                      GOTO 200
       1452                  135 VIS(I,J)=VIS(I,J-1)
       1453                      GOTO 200
       1454                  140 VIS(I,J)=VIS(I,J+1)
       1455                      GOTO 200
       1456                  145 VIS(I,J)=VIS(I-1,J+1)
       1457                      GOTO 200
       1458                  150 VIS(I,J)=(VIS(I+1,J)+VIS(I-1,J))/2
       1459                      GOTO 200
       1460                  160 VIS(I,J)=VIS(I+1,J+1)
       1461                  200 CONTINUE
       1462                      RETURN
       1463                      END
       1464            ******  END OF FILE ON OUTPUT (OT).  ******
```

Numerical Study on Unsteady Density Flows by the Modified MAC Method

By

Tomoyuki Takeuchi

Summary

In recent years, as the problems related to coastal development, environmental conservation and water resources development have become increasingly more serious, it has become more important to clarify the characteristics of the various kinds of density currents.

The numerical simulation technique is employed to assist in the experimental or theoretical studies. In this paper, the MAC (Marker-and-Cell) method is modified for the purpose of calculating the two-dimensional, two-fluid time-dependent density currents, and the free surface condition is more strictly applied.

As a typical example, the numerical simulation of the Densimetric Exchange Flow is performed. The numerical results are compared with the experiments. The results of the comparison were very satisfactorily. Due to the results, it seems apparent that the numerical technique employed in this paper is very valid for these types of flows.

水工研報告　3
1982　pp.67～100

水産増養殖施設の水力学的研究**

上北　征男*

目　次

1. 序……67
2. 人工魚礁の工学研究……69
  2.1 はしがき……69
  2.2 人工魚礁の着底衝撃力……69
    2.2.1 理　論……69
    2.2.2 模型実験……70
    2.2.3 実験結果の解析……72
    2.2.4 基盤反力係数についての考察……75
  2.3 人工魚礁の安定……75
    2.3.1 海底構築物に働く流体力理論……75
    2.3.2 海底構築物に働く流体力実験……76
    2.3.3 実験結果とその考察……77
3. 垂下式養殖施設……79
  3.1 はしがき……79
  3.2 垂下連に働く波力……80
    3.2.1 理　論……80
    3.2.2 模型実験……82
    3.2.3 実験結果とその考察……83
  3.3 筏式養殖施設に加わる外力基準化（試案)……83
4. 浮施設の係留系……86
  4.1 はしがき……86
  4.2 中間浮子の衝撃力吸収機構の理論……87
  4.3 模型実験……88
  4.4 実験結果とその考察……91
  4.5 中間浮子の衝撃力吸収に具備すべき条件……92
5. 結　論……93
  参考文献……94
  Summary……97

1. 序

増養殖施設は，海面および海中に布設された水産生物の増養殖を対象とした施設である。一般に海の施設には波，流れおよび風などによる外力が加わる。これら施設を設計する場合水理現象によって生じる力に対し安全であることは，石油掘削，船舶など他の海上，海中施設の工学技術と同様である。しかしながら，従来水産生物の生産施設としての増養殖施設は獲る漁業の漁具材料である網地の抵抗など漁具物理学としての研究を除き，理論的展開はほとんどなく，漁民の知恵としての経験的積み上げによって施工されてきたのが現状である。近年の栽培漁業における漁場整備，造成のための諸施設に関する工学的研究は，様々な増養殖施設の開発と相俟って緒についたばかりといえる。

本研究は増養殖漁場造成における底設施設および浮施設の設計法を求めようとするもので，底設施設については主要な漁場造成技法である人工魚礁を中心に，浮施設については理論展開の殆んどない垂下養殖施設および養殖場施設として広く用いられている係留浮体の力学的位置付け(衝撃力緩和機構)を明確にすると同時にこの立場からの設計法を求める。人工魚礁の工学的研究については，魚礁の後流域について黒木他1)，槻木他2)の研究がある。黒木らは，一様流中での魚礁の後流域について色液の変化から後流域の範囲および流況を観察し，分類した。また波動下での魚礁による渦の発生規模についても求めグラフ化している。槻木らは，振動流中での魚礁背後の後流渦のシュミレーションを行ない魚礁形状の変化による後流渦の範囲を求めている。吉良他3)，佐藤4)は，円筒型角型魚礁を対象に，魚礁全体に作用する流水抵抗を測定し，抗力係数 C_D が Re 数の関係であることを求めた。また佐藤3)は基盤が洗堀を受ける場合の魚礁の安定，魚礁の振動による沈下現象について，魚礁が砂中を沈下する運動を高粘性流体中の落下運動との場合と同様と仮定し，運動方程式とよく一致することを実験から確かめた。吉良5) 飯倉他6)は，各種型状の魚礁の投下時の散らばりについて模型実験より明らかにしている。構造的には，酒井7,8)は，魚礁の着底後の破壊状況の観察か

---

* 水産土木工学部

** 本論文は，著者の学位請求論文をまとめ直したものである。本論文に対し，昭和56年6月大阪府立大学より農学博士の学位が授興された。

ら，魚礁の形状と構造力学特性について柱の太さや窓の大きさを変えた場合の解析を行ない，特定のL型魚礁を提起し力学的解析を行なっている。尾崎9) は同じくコンクリート製円筒型魚礁の落下実験を行ない配合による強度比較を行なっている。一方，海底に着底後の人工魚礁の安定の問題については，海岸構造物，海洋構造物としての研究がある。

海中の物体に作用する波力の研究は，大別して，次の3つに大別される。

① 消波工，根固め工を含む海岸構造物に作用する波圧，波力

② 海底から海面までの柱状体に作用する波力

③ 船舶など浮体に作用する力

①は，海岸堤防，防波堤に加わる波圧やその軽減工法として設置される消波，根固めブロックの重量の算定を目的とした研究が多い。壁体に作用する波圧の研究は広井を始め内外で数多くの研究がある10)。単体構造物の安定については，1949年にIrribarren11)により斜面上の捨石の安定理論が提唱された。その後1959年に Hudson12) によって修正され，現在 Hudson式として公式化されている。Hudson 公式は，式中に実験係数 K_D が含まれ，ブロックの個々の形状の相違によって値が求められ重量算定に用いられている。

②は，1950年に Morison J. R. et al13) により入射波長に比して径が小さく垂直な円柱に作用する波力の算定式としてMorison式が提唱された。一方径が大きな円柱に対しては，円柱背後の波の変形を考慮し，回折理論を用いて作用力を算定する方法が，MacCamy R. C. and Fuchs. R.A.14)により求められ，一般に広く用いられている。

Morison式の妥当性については，多くの研究者により研究が行なわれ，特に式中の抗力係数C_D，質量力係数C_Mについては，土屋他15)，E. R. Johnson16) が($K.C.$)数（$=U_mT/D$）との関係を，鹿島他17)，Al-Kazily M. F.,18) 林他19) が波の周期内における C_D，C_Mの時間的変化を，槌木他20)が作用する波の条件による変化と揚力について，Sarpkaya21)，岩垣他22,23)が後流渦の発生との関係について模型実験を行ない議論しているが結論が出るに至っていない。以上の研究は，主として海上，海中施設の支持杭である円柱を対象としたもので，海底面に水平に置かれた構造物を対象として研究されたものは，Garrison Seetharama24)，Garrison，philip25)，chakrabarti26)，堀川他27)があるに過ぎない。特に人工魚礁など部材が複雑に組み合わされ，部材間の干渉すにわち境界の影響を考慮しなければならない場合については，ほとんど研究がなされていないのが現状である。

③については，船舶工学の分野で数多くの研究がなされている。しかし，これら船舶を対象とした研究を垂下式養殖施設などの浮式水産施設に直接応用することはできない。また係留法に関しても，船舶で広く用いられているチェーンカテナリ方式，海洋構造物に採用されているシンカー方式の応用は可能であるが水産施設でよく用いられている中間浮子による方式については，その理論的解明が行なわれていない。

上述の如く水産施設については部分的に研究は行なわれているものの設計に際して未解明の部分がほとんどである。本研究は増養殖施設の工学的設計上未解明の部分を解明し，設計法を確立しようとしたもので，現在最も重要な増養殖技法となっている人工魚礁および浮施設に関する設計法の開発をするものである。

一般に，水産増養殖施設等海中物体に働く流体力は，流体中の物体が流体運動に対し相対的な運動をとるとして，（1・1）式に示される運動方程式を基礎式として解析される。

$$
\begin{aligned}
\sigma V\dot{\boldsymbol{U}} = {} & (\sigma-\rho)\mathrm{Vgrad}\ \varOmega - C_{MA}\rho V(\dot{\boldsymbol{U}}-\dot{\boldsymbol{u}}) \\
& + \rho V\dot{\boldsymbol{U}} - C_D A\frac{\rho}{2}|\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u}|(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u}) + \rho\varGamma(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u}) \\
& + \boldsymbol{F} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1\cdot 1)
\end{aligned}
$$

ここで，σ および ρ は物体および流体の密度，$\boldsymbol{U}$ および $\boldsymbol{u}$ は物体および流体の速度，V は，物体の水中容積，$\varOmega$ は重力ポテンシャル，C_{MA} および C_D は付加質量係数および抗力係数，A は物体の流れに対する射影面積，$\varGamma$ は物体の回りの循環，$\boldsymbol{F}$ は一般外力を示す。

（1・1）式の左辺は慣性力であり，右辺第一項は重力および浮力すなわち流体中の重力である。右辺第2項は付加質量項であり，物体および流体が相対速度をもつために物体によって流体に与えた運動量変化の反作用として物体に働く力である。第3項は流体に非定常運動を与える力で物体を囲む閉曲面に作用する水圧の合計である。第4項は抗力と呼ばれ水の粘性に基づく抵抗である。第5項は揚力項であり，第6項は係留索とか推進力といったその他の外力である。水産増養殖施設の水力学は（1・1）式の展開を必要な境界条件を与えて行なうことによって議論される。

最後に，本研究は，現場漁民からの漁場造成に対する強い要望と熱意に対し，技術的側面からの追求の必要性を痛感したのが始まりで，水産増養殖施設の設計上の問題点を整理し，経常および行政対応の試験研究として行なったものをとりまとめたものである。データーのとりまとめに際し，水産土木工学部長中村充博士には終始有益な御助言と御指導を賜った。

さらに，本論文をまとめるに当り，懇切な御教示を載いた。ここに深甚の謝意を表します。本研究をまとめるにあたり，終始熱心な御指導ならびに御校閲を賜った大阪府立大学中谷三男博士，また貴重な御助言ならびに御校閲を載いた大阪府立大学矢吹万寿博士，梅田重夫博士に深謝申し上げます。

更に，本実験の実施にあたり，元東海大学学生飯野達夫氏，山崎秀勝氏，元東京水産大学学生大竹臣哉氏には多大の御助力を得ましたことに対し，深く感謝します。

2.　人工魚礁の工学的研究

2.1　はしがき

人工魚礁は，海底または海中に地形的に変化を与えて集魚を図る漁具として，あるいは増殖，培養を図る漁場造成として重要である。人工魚礁の歴史は古く，昭和初期から築礁として漁民の間では施工されてきたが，昭和29年に従来の築礁の中で魚類を対象とするものを人工魚礁と総称されるようになり，沿岸域における水産生産の向上に大きな役割を果してきた。また，その規模は，単体的，群体的にも近年ますます大型化が進められるようになってきた。

人工魚礁に用いられる材料は，岩石，コンクリート魚礁，鋼製魚礁をはじめ，古タイヤ，廃船，古自動車，電車などの廃物利用もあるが，国の事業として行なわれているものは，コンクリートまたはこれと同等以上の耐久性資材で，有害物資を溶出せず安定的に供給出来るものとして，廃物利用は原則として採用していない。

従来，標準的に用いられてきた魚礁は，その単位規模があまり大きくなく，たとえば角型魚礁1辺1.5〜2.0m，重量1.7〜2.3ton，1ケ所に群体として設置個数が数十〜数百個であるため，その設置に際しては，洋上投入されてきた。この時の問題点として，落下過程での散らばり，着底衝撃による破壊がある。前者については，吉良[5]，飯倉[6]等の報告があるが後者についての研究は，わずかに酒井[7,8]による研究があるのみである。一方，実際施工に際しての潜水調査から破壊していることがしばしば報告されている。近年，魚礁群体の大規模化に伴ない，魚礁単体自体の大規模化が進められる傾向にあり，この場合の設置方法は，クレーン等による吊り下げ方式が採用される場合が多い。この場合も洋上投入と同様，着底時のクレーン吊り下げ速度のいかんにより着底衝撃が生じる。

人工魚礁の設計は，製作から運搬，設置，設置後の安定・機能の維持について行われる。これら諸条件のうち陸上におけるものは従来の構造力学の範疇に属するので，ここでは海中における設計外力に関する事項を研究する。具体的にはまず着底衝撃であり，第2には沈設後の安定に関する設計流体力の解析である。以下これについてのべる。

2.2　人工魚礁の着底衝撃力

2.2.1　理　論

a. 魚礁の水中落下速度

水中落下物体の落下時の運動方程式は，式（1・1）で鉛直方向の落下速度をv，流体は静止として$u=0$とすれば式（2・1）で示される。

$$\sigma V\dot{v}=g(\sigma-\rho)V-C_DA\rho v^2/2-C_{MA}\rho V\dot{v}\cdots(2\cdot1)$$

ここに，σおよびρは魚礁材料，海水の密度，VおよびAは魚礁の実容積および流れに対する射影面積，C_DおよびC_{MA}は抗力係数および付加質量係数である。

終端速度v_cは，$\dot{v}=0$から

$$v_c=\sqrt{\frac{2gV}{C_DA}\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot2)$$

となる。式（2・2）を（2・1）に代入して

$$\frac{dv}{{v_c}^2-v^2}=\frac{g(\sigma/\rho-1)}{(\sigma/\rho+C_{MA}){v_c}^2}dt$$

水表面から測った水深をとし，初期条件 t=0 で$z=0$，$v=0$とおくと，

$$v=v_c\tanh\left\{\frac{g(\sigma/\rho-1)t}{\sigma/\rho+C_{MA}){v_c}^2}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot3)$$

$$z=\frac{(\sigma/\rho+C_M){v_c}^2}{g(\sigma/\rho-1)}\ln\cosh\left\{\frac{g(\sigma/\rho-1)t}{(\sigma/\rho+C_{MA}){v_c}^2}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot4)$$

式（2・3），（2・4）から水深h（$z=h$）だけ落下した時の速度v_0は，

$$v_0=v_c\left[1-\exp\left\{-\frac{2gh(\sigma/\rho-1)}{(\sigma/\rho+C_{MA}){v_c}^2}\right\}\right]^{1/2}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot5)$$

となる。

b. 魚礁の水中落下着底時の着底衝撃力

着底衝撃力は，魚礁の重さ，衝突時の速度，着底基盤の反力係数，および衝突面の形状によって定まる。衝突面の基盤反力をR，着底時の付加質量係数をC_{MA}とすると，

$$\sigma V\dot{v}=g(\sigma-\rho)V-C_DA\rho v^2/2-C_{MA}\rho V\dot{v}-R\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot6)$$

となる。

また基盤反力Rは，一般に基盤変位εのn乗に比例するとし，基盤反力係数をKとおくと

$$R=K\cdot\varepsilon^n\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot7)$$

で示される。一般にnは，基盤が先投魚礁ビームのようなとき，$n=1$，海底が面形状のとき$n=2$に近くなる。

$v=\dot{\varepsilon}$，$v=\varepsilon$であるから式（2・6）は，

$$\left(\frac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\ddot{\varepsilon}+\frac{C_DA}{2V}\dot{\varepsilon}^2+\frac{K}{\rho V}\varepsilon^n=g\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot8)$$

となる。両辺に変位$d\varepsilon$を乗ずればエネルギー式となり，式（2・8）で$d\varepsilon=v\cdot dt$であり，衝突直前の速度をv_0として，εを0から最大変位ε_{max}までεについて積分すると式（2・9）を得る。

$$-\left(\frac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\frac{v_c^2}{2}+\frac{C_DA}{2V}\int_0^{\Delta t}v^3\cdot dt$$

$$+\frac{K\varepsilon_{max}^{n+1}}{(n+1)\rho V}=g\varepsilon_{max}\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right) \quad \cdots(2\cdot9)$$

式（2・9）の左辺第2項は，衝突の時間Δt間に行なう抗力の仕事量で，他の項に比較して微小であるので

$$v=v_0\left(1-\frac{t}{\Delta t}\right)$$

で近似すると，

$$\int_0^{\Delta t}v^3dt=v_0^3\int_0^{\Delta t}\left(1-3\frac{t}{\Delta t}+3\frac{t^2}{\Delta t^2}-\frac{t^3}{\Delta t^3}\right)dt$$

$$=\frac{1}{4}v_0^3\Delta t=\frac{1}{2}v_0^2\varepsilon_{max}$$

となり，式（2・9）は式（2・10）となる。

$$\frac{K\varepsilon_{max}^{n+1}}{(n+1)\rho V}-\left[g\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)-\frac{C_DA}{4V}v_0^2\right]\varepsilon_{max}$$

$$-\left(\frac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\frac{v_0^2}{2}=0 \quad \cdots\cdots\cdots(2\cdot10)$$

魚礁が海底面に着底する場合$n=2$となり，式（2・10）は3次方程式となる。重力単位に直して水の単位体積重量を$w_0=\rho g$とおくと，式（2・11）となる。

$$\frac{gK\varepsilon^3{}_{max}}{3w_0V}-\left[g\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)-\frac{C_DA}{4V}v_0^2\right]\varepsilon_{max}$$

$$-\left(\frac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\frac{v_0^2}{2}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot11)$$

式（2・11）をε_{max}について解き，式（2・12）に代入すれば，基盤反力を求めることができる。

$$R_{max}=K\cdot\varepsilon^2{}_{max} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot12)$$

着底衝突時の部材応力を計算するには，部材に加わる慣性力を外力として考えるため，着底時の衝撃力を加味した等価単位重量（以下衝撃単位重量という）σ_Gで与えたほうが便利である。

すなわち

$$R_{max}=\sigma_GV \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot13)$$

とおいて式（2・13）と式（2・12）を用いて

$$\overline{\sigma}_G=\frac{K}{V}\cdot\varepsilon^2{}_{max} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot14)$$

を求め，この衝撃単位重量$\overline{\sigma}_G$を魚礁材料の単位重量として静力学的構造設計を行う。

あるいは衝突時加速度がaになるとして

$$k=\frac{a}{g}=\frac{R_{max}}{\sigma gV}=\frac{K\varepsilon^2{}_{max}}{\sigma_GV} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot15)$$

で衝突時加速度がgのk倍すなわち，重力がk倍になるとして衝撃単位重量を求めることもできる。比重の異なる複合部材よりなるときは式（2・15）の表現が便利である。

水深が深く魚礁を洋上投入する場合，v_0が大となるため，式（2・10）の第2項は，第1，第3項に比し省略されε_{max}は，式（2・16）で求められる。

$$\left.\begin{array}{l}
\varepsilon_{max}=\left\{\dfrac{w_0Vv_0^2}{2gK}(n+1)\left(\dfrac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\right\}^{1/(n+1)} \\
n=2\text{ のとき} \\
\varepsilon_{max}=\left\{\dfrac{3w_0Vv_0^2}{2gK}\left(\dfrac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\right\}^{1/3} \\
n=1\text{ のとき} \\
\varepsilon_{max}=\sqrt{\left(\dfrac{\sigma}{\rho}+C_{MA}\right)\dfrac{w_0Vv_0^2}{gK}}
\end{array}\right\}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot16)$$

式（2・16）を式（2・14）式（2・15）に代入して$\overline{\sigma}_G$又は$\boldsymbol{k}$が求まる。

2.2.2　模型実験

a．実験の方針

水中落下物の着底時の運動に関する式（2・10）の実証および同式中の抗力係数C_D，付加質量係数C_{MA}を解析する。この実験では，水中落体は計器の受圧板（鉄製）に運動量を与え，合体して圧縮計に作用する。従って，着底衝撃を受ける圧縮計の特性から，単にその反力係数を求めることはできない。従ってまず，抗力・付加質量力の省略可能な空中実験によって計器の反力係数を求め，この計器を水中に使用して付加質量係数を解析する。

b．落下物体模型

落下物体に用いた模型は，抗力係数の明らかな球体を用いた。その材質特性を示したのが表2.2である。

c．空中落下実験

空中落下による着底衝撃力および落下物体速度の測定を行い，計器の反力係数を求める。

実験装置は，図2.1に示す。この場合，衝撃力の測定には，最大測定可能荷重200kgのヒズミゲージ荷重計を一辺10cmの正三角形にコンクリートで固定し，その上に厚さ$t=9.0$(mm)，大きさ300×300(mm)の正方形の鉄板を載荷して，その板に落下物体が着底するときの衝撃

表 2.1 落下物体模型と着底板の規格・寸法
Falling model and steel bace

模型名称 Model	落下物体 Falling sphere				着底板 Bace
形状 Body form	球体 Sphere				板 Plate
材質 Quality	鉄 Steel		プラスチック Plastic		鉄 Steel
弾性係数 (kg/cm²) Modulus of elasticity	$E_s=2.1\times10^6$		$E_p=(3.33\sim3.49)\times10^4$		$E_s=2.1\times10^6$
寸法 (cm) Dimension	$\phi=$ 5.0	$\phi=$ 2.0	$\phi=$ 5.0	$\phi=$ 2.0	30×30×0.9
質量 (gr) Mass of the model	534.7	32.67	94.02	6.32	6,300
容積 (cm³) Capacity of the model	65.5	4.2	65.5	4.2	807.7

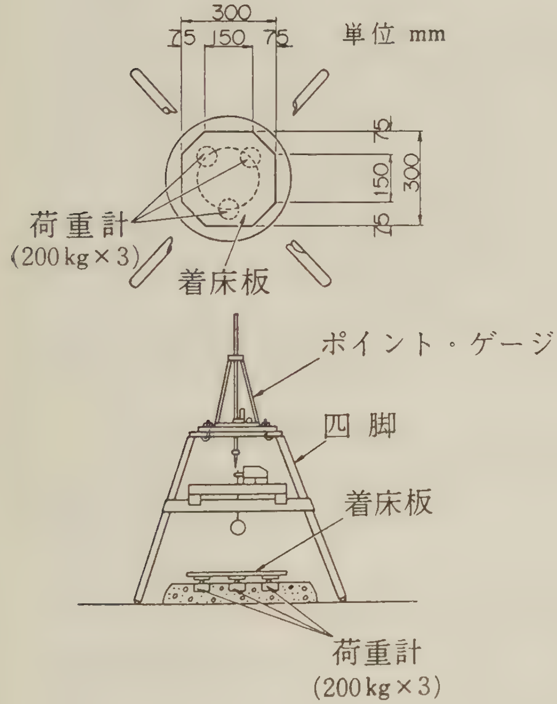

300
75
150
75
単位 mm
75
150
300
75
荷重計
(200 kg×3)
着床板
ポイント・ゲージ
四脚
着床板
荷重計
(200 kg×3)

図 2.1 実験装置（空中実験の場合）
Schematic representation of the falling test in air

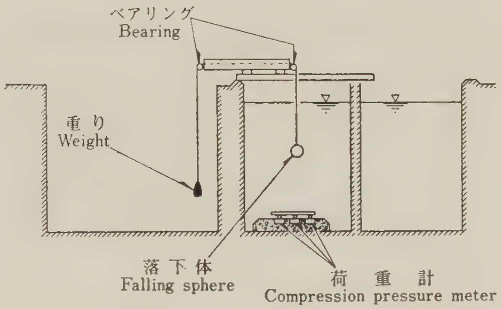

ベアリング
Bearing
重り
Weight
落下体
Falling sphere
荷重計
Compression pressure meter

図 2.2 実験装置（水中実験の場合）
Schematic representation of the falling test in water

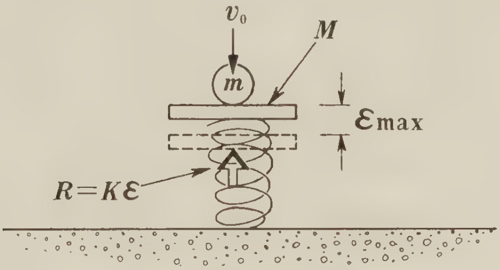

v_0
M
m
ε_{max}
$R=K\varepsilon$

図 2.3 着底衝撃力測定装置の模式化
Model of the landing shock reaction appratus

力を，動ヒズミ計で増幅した後シンクロスコープに記録し，写真撮影した。また，落下物体の着底する際の速度 v_0(cm/sec) および落下中の速度 v(cm/sec) の測定は，毎分6000回転のストロボ撮影し，落下2物体間の距離をカーブリーダで読みとり，その距離から，その落下地点での平均落下速度および着底速度を求めた。なお，着底速度を検証するため，落下高さをポイントゲージを用い，1/10mmまで読み取って空中における自由落下物体の着底時の速度を求め，ストロボの結果と照合した。

d．水中落下実験

水中落下実験による着底衝撃力および着底速度を測定し，式（2・10）を検証した。

水中実験に用いた測定装置は，空中実験の場合の反力係数Kと同一にするため，同じ測定装置を用いた。なお水中落下物体については図2.2に示すように，重さが無視できる糸で，摩擦が非常に小さいベアリングを介して門型に吊し，その一端に落下模型を，他端には重量の判っている重錘を吊した。落下速度は，吊糸に取りつけた指標が後側に固定してあるメジャーの前面を通り過ぎる速度を，空中実験と同様に，毎分6000回転のストロボ撮影し，その平均速度および着底直前の速度をもって，落下速度 v(cm/sec)，着底速度 v_0(cm/sec) とした。

2.2.3　実験結果の解析

a．空中実験による着底衝撃力と反力係数

i）実験解析に用いた理論式

着底衝撃力の測定装置を，図2.3に示すように模式化した。質量$m(gr)$の落下物体が着底速度v_0で質量$M(gr)$の着底板に衝突したとき，mはMに運動量を与え，同じ速度でヒズミ計を圧縮し，最大ヒズミに達した後反撥するものと考える。

衝突時の運動量から

$$(m+M)v_s=mv_0$$

$$v_s=\frac{m}{m+M}v_0 \quad \cdots\cdots(2\cdot17)$$

v_sを初期速度としての運動方程式は空気の抗力・付加質量を無視して

$$(m+M)\dot{v}=(m+M)g-R \quad \cdots\cdots(2\cdot18)$$

荷重計の反力はヒズミ量 ε に比例するから

$$R=K\cdot\varepsilon \quad \cdots\cdots(2\cdot19)$$

とおいて，

$$(m+M)\ddot{\varepsilon}=(m+M)g-K\varepsilon \quad \cdots\cdots(2\cdot20)$$

これより

$$\ddot{\varepsilon}+\frac{K}{(m+M)}\varepsilon=g \quad \cdots\cdots(2\cdot21)$$

となり，式（2・21）を時間で積分し

$$\varepsilon=A\exp\left(i\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\right)+B\exp\left(-i\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\right)+\frac{(m+M)g}{K}$$

$$\varepsilon=C_1\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+C_2\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+\frac{(m+M)g}{K} \quad \cdots\cdots(2\cdot22)$$

初期条件 $t=0$ で $\varepsilon=0$ から

$$C_2=-\frac{(m+M)g}{K}$$

C_2を式（2・22）に代入して

$$\varepsilon=C_1\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}\,t+\frac{(m+M)g}{K}\left(1-\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\right)$$

また，$v=\dot{\varepsilon}$ より

$$v=\dot{\varepsilon}=C_1\sqrt{\frac{K}{m+M}}\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+\frac{(m+M)g}{K}\sqrt{\frac{K}{m+M}}\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}t \cdots(2\cdot23)$$

式（2・23）に，初期条件 $t=0$ で，$v=v_s=mv_0/(m+M)$ を代入すると，

$$C_1=\frac{mv_0}{\sqrt{K(m+M)}}$$

よって式（2・22），式（2・23）は，

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon&=\frac{mv_0}{\sqrt{K(m+M)}}\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+\frac{(m+M)g}{K}\left(1-\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\right)\\ v=\dot{\varepsilon}&=\frac{mv_0}{m+M}\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+g\sqrt{\frac{m+M}{K}}\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\end{aligned}\right\}(2\cdot24)$$

となり，これを式（2・19）に代入すると式（2・25）となる。

$$R=mv_0\sqrt{\frac{K}{m+M}}\sin\sqrt{\frac{K}{m+M}}t+(m+M)g\left(1-\cos\sqrt{\frac{K}{m+M}}t\right)\cdots\cdots(2\cdot25)$$

一方，落下物体が着底後 $v=0$ となるに要する時間をTとすれば，式（2・24）に $v=0$，$t=T$ を代入して式（2・26）を得る。

$$\tan\sqrt{\frac{K}{m+M}}T=-\frac{mv_0}{g(m+M)}\sqrt{\frac{K}{m+M}}\cdots(2\cdot26)$$

そのとき，ε_{max}，R_{max}は，

$$\varepsilon_{max}=\frac{m^2v_0{}^2}{\sqrt{m+M}\sqrt{m^2v_0{}^2K+g^2(m+M)^3}}+\frac{(m+M)g}{K}\left\{1+\frac{g(m+M)^{3/2}}{\sqrt{m^2v_0{}^2K+g^2(m+M)^3}}\right\}\cdots\cdots(2\cdot27)$$

$$R_{max}=K\cdot\varepsilon_{max}=\frac{Km^2v_0{}^2}{\sqrt{m+M}\sqrt{m^2v_0{}^2K+g^2(m+M)^3}}+(m+M)g\left\{1+\frac{g(m+M)^{3/2}}{\sqrt{m^2v_0{}^2K+g^2(m+M)^2}}\right\}\cdots\cdots(2\cdot28)$$

となる。

測定装置にはヒズミゲージ式荷重変換器を用いているため，$\varepsilon\ll0$, $K\gg0$となる。そのため式（2・26），式（2・28）は，式（2・29）のように近似できる。

$$\left.\begin{aligned}T&=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m+M}{K}}\\ R_{max}&=\frac{mv_0\sqrt{K}}{\sqrt{m+M}}+(m+M)g\fallingdotseq\frac{v_0\sqrt{mK}}{\sqrt{1+M/m}}\}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2\cdot29)$$

空中落下実験より求めた着底反力 R_{max} および作用時間Tより，式（２・29）を用いて，反力係数Kを求めた。

ii）実験結果と考察

空中落下の場合の着底衝撃力Rの時間的変化曲線の実測結果の代表的なものを図 2.4 に示す。

空中落下の場合の着底衝撃力の実験値より，横軸に反力Rから落下物体，着床板の重量$(m+M)g$を引いた値$\{R/g-(m+M)\}$(kg) を，縦軸に着底直前の落下速度v_0(cm/sec)をとり，プロットしたのが図2.5 である。図中の線は45° の傾きを持ち，Rとv_0が比例関係にあり，式（２・29）の関係が正しいことを示している。図 2.5 および式（２・29）より，反力係数Kを各実験ケースごとに求めた値を図 2.6 に示す。

図2.6中には，衝撃時間Tおよび反力の実測値 R_{max} か

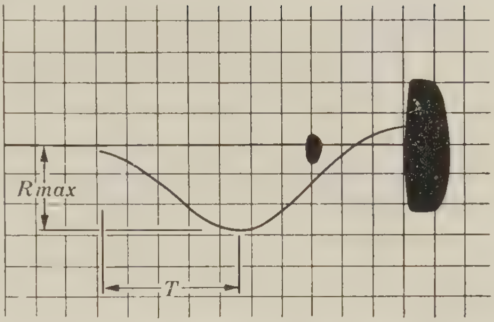


図 2. 4 空中実験における反力ー時間曲線

横軸 1×10^{-4} sec／目盛

縦軸100.3kgr重／目盛

Experimental curve of the landing shock reaction(R)-time(T) in air

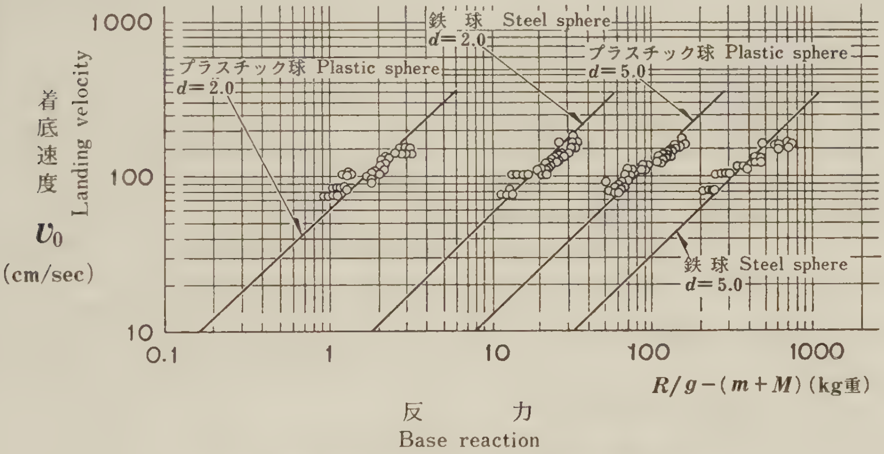


図 2. 5 落下物体の着店速度と反力（空中実験の場合）

Relationship between landing velocity (v_0) and base reaction ($R/g-(m+M)$) on the falling experiment in air

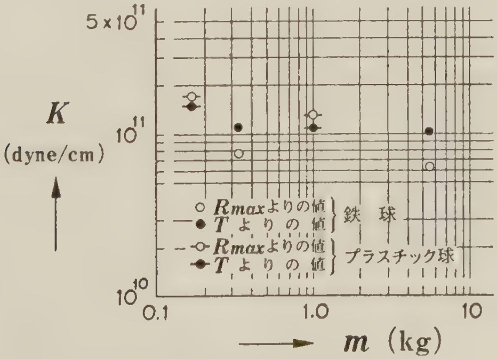


図 2. 6 反力係数 K（空中の場合）

Bace reaction coefficient K in air

ら式（2・26），（2・28）を用いてを求めた結果を示している。両観測値による値はほぼ一致し，また材質による違いも少ない。材質や球の大きさによる若干のばらつきは，材料の弾性係数，球面の曲率半径の相違による衝撃面の変化によるものであろうが，全体として，ヒズミ計の特性値は，ほぼ $K=1.1\times10^{11}$(dyne/cm)$=1.12\times10^{5}$(kg/cm) を得た。

b. 水中落下実験

水中落下実験には，空中実験で用いた同一球体，同一測定装置を用いた。

i) 解析に用いた理論式と実験結果

水中実験の場合の運動方程式を示すと式（2・30）となる。

$$(\sigma_1 V_1+\sigma_2 V_2)\dot{v}=(\sigma_1-\rho)V_1 g+(\sigma_2-\rho)V_2 g-\frac{\rho v^2}{2}(C_{D1}A_1+C_{D2}A_2)-(C_{MA1}V_1+C_{MA2}V_2)\rho\dot{v}-R \quad \cdots\cdots(2\cdot30)$$

ここに，σ_1，σ_2，V_1，V_2 は落下物体および着底板の密度と実容積，g は重力加速度，ρ は水の密度，v_0，v，v_s は落下物体の着底時および着底後の速度および落下物体の着底直後の速度，C_{D1}，C_{D2}，C_{MA1}，C_{MA2} は落下物体および着底板の抗力係数および付加質量係数，R は反力である。式（2・30）に，空中実験で求めた $R=K\cdot\varepsilon$ を代入すると

$$\{(\sigma_1 V_1+\sigma_2 V_2)+(C_{MA1}V_1+C_{MA2}V_2)\rho\}\dot{v}=(\sigma_1-\rho)V_1 g+(\sigma_2-\rho)V_2 g-\frac{\rho v^2}{2}(C_{D1}A_1+C_{D2}A_2)-K\varepsilon \quad \cdots\cdots(2\cdot31)$$

式（2・31）を式（2・10）の誘導に準じて積分し，空中実験から K が非常に大，ε が非常に小であるので，各項をオーダーエスティメイトして，$\sigma_1 V_1=m$, $\sigma_2 V_2=M$ とおくと，

$$\varepsilon=\frac{v_s}{\sqrt{K}}\{(m+M)+(C_{MA1}V_1+C_{MA2}V_2)\rho\}^{1/2} \quad \cdots\cdots(2\cdot32)$$

となる。この式に $R=\overline{\sigma_G}V=K\cdot\varepsilon$ を代入して，衝撃単位重量 $\overline{\sigma_G}$ を求める。M, ρ を重量単位で示し，m_G，M_G，でおけば，

$$\sigma_G=\frac{v_s}{V_1+V_2}\sqrt{\frac{K}{g}(m_G+M_G)+w_0(C_{MA1}V_1+C_{MA2}V_2)} \quad \cdots\cdots(2\cdot33)$$

である。ここで v_s は着底直後の速度である。

また水中落下物体の着底直前の速度を v_0(cm/sec) とおくと着底直後の速度は v_s(cm/sec) であるので，運動量保存の法則から

$$m_G v_0=(m_G+M_G)v_s$$

が得られ，

$$v_s=\frac{m_G}{(m_G+M_G)}v_0$$

となる。これを式（2・33）に代入すれば，

$$\overline{\sigma_G}=\frac{m_G v_0}{V_1+V_2}\sqrt{\frac{K}{g}\left\{\frac{1}{(m_G+M_G)}+\frac{w_0(C_{MA1}V_1+C_{MA2}V_2)}{(m_G+M_G)^2}\right\}} \quad \cdots\cdots(2\cdot34)$$

となる。

iii) 実験結果の考察

式（2・6）の着底時の運動方程式を検証するため，実

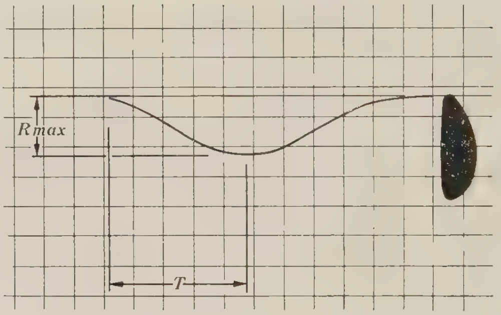


図 2.7　水中実験における反力時間曲線

横軸1×10⁻⁴ sec／目盛

縦軸130.0kgr重／目盛

Experimental curve of the landing shock reaction (R)-time (T) in water

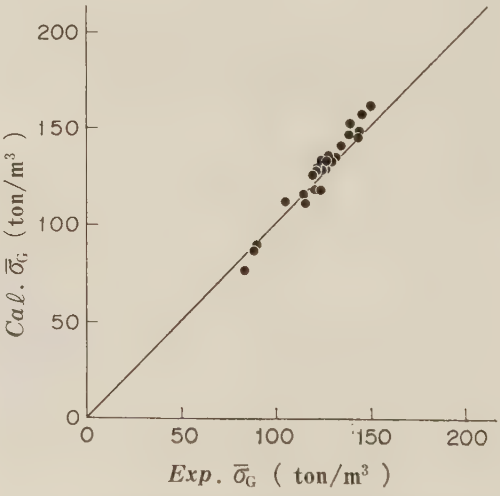


図 2.8　衝撃単位重量の実測値と計算値の比較

Comparison of the experimental values in water with the eq. (34)

験装置に合わせて模式化した式（2・32)，（2・33）を用いて解析した。図2.7は，水中における着底時の基盤反力Rの，代表的な波形を示したものである。今，水中落下物体の付加質量係数 C_{MA} に，ポテンシャル理論による値を用いる。着底時の衝撃力に対する荷重計のヒズミ量 ε は非常に小さいので，着底板の$C_{MA2}=2.0$，球体の$C_{MA1}=0.5$を（2・33）式に代入して求めた衝撃単位体積重量$\overline{\sigma_G}$の計算値と，水中実験から基盤反力Rを求め，$\overline{\sigma_G}=R/(V_1+V_2)$ として求めた実験値とを比較したのが図(2.8)である。

図(2.8)によると，着底時の衝撃単位重量$\overline{\sigma_G}$の実験値は，ポテンシャル理論による付加質量係数 C_{MA} を用いた計算値とほぼ一致している。更に詳しくみてみると，$\overline{\sigma_G}$が大きい場合には，計算値に比較して，実測値の$\overline{\sigma_G}$は小さくなる傾向がみられるが，これは衝撃時落下物体と受圧板の面での変形によるエネルギー損失があるためである。このことより，着床時の衝撃力は，水中落下物体の着床時の付加質量係数に，各形状に応じたポテンシャル理論による値C_{MA}を，式（2・23）に代入して計算すればよいといえる。

2.2.4 基盤反力係数についての考察

式（2・10)～(2・16）に見られるように，着底時発生する衝撃力は，海底の硬軟，すなわち力学的特性に関する基盤反力係数によって左右される。海底面に衝撃荷重Rが集中荷重として加わった場合の地盤反力分布は弾性論に基づくBoussinesqの解析，および応力集中を考慮した *Fröhlich* の理論によれば，地表下 z なる位置での軸圧力 σ_z は，式（2・35）で示される。

$$\sigma_z=\frac{\nu R}{2\pi z^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot35)$$

ここに，ν は応力集中係数で，$\nu=3$ で完全弾性体と一致し，Fröhlichによれば，砂地盤に対しては$\nu=4$～5，粘土地盤に対しては$\nu=3$の値をとる。

地表下でのヒズミ率 e は，弾性係数Eとして

$$e=\frac{\nu R}{2\pi E z^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot36)$$

となる。よって，荷重Rによる表面沈下量 ε は，無限厚の地盤と考えて，

$$\varepsilon=\int_{\varepsilon}^{\infty}\frac{R}{2\pi E z^2}dz=\frac{\nu R}{2\pi E\varepsilon} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot37)$$

となる。よって，海底に応力集中があった時の着底時地盤に生ずる基盤反力は，

$$\left.\begin{aligned} R&=\frac{2\pi E}{\nu}\varepsilon^2\\ &\equiv K\varepsilon^2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot38)$$

以上の考察から人工魚礁等海中落体が海底面に着底する際の n は，$n=2$ となる。

2.3 人工魚礁の安定

2.3.1 海底構築物に働く流体力理論

人工魚礁等海底構築物に働く流体力に関する研究は，Morison & O'Brienによる研究をはじめ数多くの研究がある。これは式（1・1）で物体流速$\boldsymbol{U}=0$であり，流体力以外の外力Fが働かない場合の水平方向の流体力は

$$F_f=(C_{MA}+1)\rho V\dot{u}+C_DA\frac{\rho}{2}u^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot39)$$

となる。

Morison-ÓBrienは，（2・39）式の u に微小振幅波理論による次式

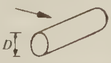
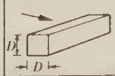
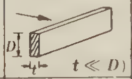
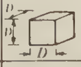
$$\left.\begin{aligned} u_1&=u_m\sin\theta\\ u_m&=\frac{\pi H}{T}\cdot\frac{\cosh 2\pi(z+h)/L}{\sinh 2\pi h/L}\\ \theta&=\frac{2\pi}{L}x-\frac{2\pi}{T}t\\ \dot{u}_1&=-\frac{2\pi}{T}u_m\cos\theta \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot40)$$

を用い C_D, C_{MA} を求めた。

ここに，u_1 は波運動による水平流速，H, L および T は波の波高，波長，周期，h は水深，z は海面(静水面)

表 2.2 各種形状による抗力係数 (C_D) と付加質量係数 (C_{MA})

Drag coefficient (C_D) and added mass coefficient (C_{MA})

名　　称	円　柱	四角柱	板	球	正八面体
形　　状					
抗力係数 (C_D)	1.0	2.0	2.0	0.5	1.0
付加質量係数 (C_{MA})	1.0	1.2	—	0.5	0.67

を基準にとった鉛直座標（上向に正とする），x は水平座標（波の進行方向に正），t は時間である。

その後多くの研究者によって，C_D, C_{MA}の研究が行なわれ現在に及んでいるが，実用上のC_D, C_{MA}は表 2.2 に示す値が用いられている。

a．波と流れの場における流体力

海中のように波と流れのある場での流体力は以下のように理論展開が可能である。

潮流等の流速 u_0 とすると，波による流速 u_1 を重ねて

$$u=u_0+u_1=u_m\ \sin\theta+u_0$$

であるから式（2・39）は

$$F_f=\frac{C_DAw_0}{2g}(u_m\sin\theta+u_0)^2-\frac{2\pi C_MVw_0u_m}{gT}\cos\theta$$

ここに，$w_0(=\rho g)$ は水の単位重量，$C_M=C_{MA}+1$ である。いま，

$$\left.\begin{aligned}F_D&=\frac{C_DAw_0u_m^2}{2g},\quad \alpha=\frac{u_0}{u_m}\\ F_M&=\frac{2\pi C_MVw_0u_m}{gT}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(2\cdot41)$$

とおけば

$$F=F_D(\sin\ \theta+\alpha)^2-F_M\cos\theta\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot42)$$

（2・42）式は波の位相θによって変化する。Fを最大にする位相は，$dF/d\theta=0$, $d^2F/d\theta^2|_{\theta=\theta_1}<0$ の条件から求められる。

$$\frac{dF}{d\theta}=2F_D(\sin\ \theta+\alpha)\cos\theta+F_M\sin\theta=0$$

$$\frac{d^2F}{d\theta^2}=2F_D(1-2\sin^2\theta-\alpha\sin\theta)+F_M\cos\theta<0$$

$F_M/(2F_D)=\beta$，更に簡単のためにsin $\theta=S$, cos $\theta=C$ とかく。このとき勿論 $S^2+C^2=1$ は成り立つ。

上式は，

$$\left.\begin{aligned}\frac{dF}{d\theta}&=2F_D\{C(S+\alpha)+\beta S\}=0\\ \frac{d^2F}{d\theta^2}&=2F_D(1-2S^2-\alpha S+\beta C)<0\end{aligned}\right\}\cdots(2\cdot43)$$

$dF/d\theta=0$ から，S で整理して，

$$S^4+2\alpha S^3+(\alpha^2+\beta^2-1)S^2-2\alpha S-\alpha^2=0\cdots(2\cdot44)$$

この式の実根で（2・43）式の第1式の成立を確めた根 S_i に対して

$$1-2S_i^2-\alpha S_i+\beta C_i<0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot45)$$

ならしめる S_i, C_i で F は最大値をとる。

（2・44）式は4次方程式であるから解析解，またはニュートン法による漸次解で求めることができる。

ニュートン法による場合には，

第1近似を

$$S_1=1,\ S_1=0$$

の2つの場合について

$$S_{n+1}=S_n-\frac{S_n^4+2\alpha S_n^3+(\alpha^2+\beta^2-1)S_n^2-2\alpha S_n-\alpha^2}{4S_n^3+6\alpha S_n^2+2(\alpha^2+\beta^2-1)S_n-2\alpha}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot46)$$

とし，S_n 収束値を求めることができる。この値を（2・42）式に代入してFの最大値F_0を得る。

b. 波のみによる流体力

波のみによる波力は $\alpha=0$ であるから（2・44）式は解けて

$$S^4+(\beta^2-1)S^2=0$$
$$S^2(S^2+\beta^2-1)=0$$
または $S^2(\beta^2-C^2)=0$
$$\therefore S_i=0 \text{ または } C_i=-\beta\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(a)$$

$C_i=+\beta$ は（2・43）式の第1式を満足しない。尚，(a) が最大ならしめる位相であるかどうかは（2・45）式で $\alpha=0$ とおいた(b)式で検討する。

$$1-2S_i^2+\beta C_i<0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(b)$$

(a)の$S_i=0$のとき，$C_i=\pm1$であるから，

($S_i=0$, $C_i=1$) のとき

$1+\beta>0$ となり(b)を満足しない。

($S_i=0$, $C_i=-1$) のとき

$1-\beta<0\qquad\therefore\beta>1$

$$\left.\begin{aligned}&\therefore\beta>1\\ &S=0,\ C=-1\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(c)$$

はFを最大にする条件である。

(a)の$C_i=-\beta$のとき，(b)式の$S_i^2=1-C_i^2$と変形して

$$2C_i^2+\beta C_i-1<0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(b)$$

$C_i=-\beta$のとき

$\beta^2-1<0\qquad\therefore\beta<1$

$$\left.\begin{aligned}&\therefore\beta<1\\ &C=-\beta\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(d)$$

よって波力の最大値 F_0 は(c) (d)の条件に対応して（2・42）式から

$$\left.\begin{aligned}&\beta>1\text{ で }F_{max}=F_M\\ &\beta<1\text{ で }F_{max}=F_D(1-\beta^2)+F_M\beta\\ &\beta=F_M/(2F_D)\\ &F_D,\ F_M\text{:（2・41）式の値}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2\cdot47)$$

2.3.2　海底構築物に働らく流体力実験

前節において展開した理論の実験的検討を試みる。実験は主として次の点を検証することを目的として行なった。

① 慣性力と抗力の支配領域と，それぞれの慣性力係数C_M，抗力係数 C_D について。

② 流体力の部材間相互干渉すなわち揚力の発生と全抵抗力。

である。①は前節(1)で理論的に求められた慣性力と抗力の支配領域を定める$\beta(=F_M/(2F_D))$の適性，物理的意

味を明らかにする。②は，底面と水中物体との間隙または部材間隔が狭い場合に，流れ場に循環Γが生じる。このとき部材には，流れ方向に直角な揚力が発生する。この揚力の発生について基礎式（1・1）の適用限界を明らかにする目的で行うものであるから，正確な理論解の得られ易い円柱を対象に検討する。

a．実験装置

実験水路は，図2.9に示すように，長さ21.0m，幅0.4m，深さ0.8mの片面ガラス張りの観測部をもつ2次元造波水路である。水路の上下端には，サンフレックスおよびビーチ型消波工が，また上流側にはピストン型の造波装置が取り付けられている。波高の検出には，模型直上および模型より上流40cmの位置に容量式波高計を取り付け，各位置での波高および2本の波高計の記録から波長を読みとった。波力測定装置は，アルミ製角柱のハリ部に張られたヒズミゲージの電気抵抗変化量を動歪計により増幅し，動的に水平，鉛直方向の各成分力を測定できるもので，その測定範囲は，5grから2,000grである。なお測定軸に働くトルクはヒズミゲージの張り方により相殺し，水平鉛直成分には影響がないようにしてある。実験に供した模型は，アルミ製の支持軸を有する中空塩化ビニール製の円柱で，水で充填されている。直径は$\phi_A=11.5$cm(model A) および$\phi_B=6.0$cm(model B) 長さが$l=20$cmである。水中で張力計に取り付け後の円柱の固有振動周期Tは，実測の結果各々$T_A=19.43Hz$，$T_B=29.07Hz$である。

b．実験の方法

実験は，造波板中立軸前面9.5mの位置の両水路側面に波力センサーを取り付け，センサーに模型を水平に取り付けた。実験条件は，模型と水路底の間隔eを5，10，20，30cm，水深hを，40，60cmに変化させ，模型A，Bに対して実験を行なった。実験波の諸元は，周期$T=0.6$～1.9sec，波高$H=3.0$～14.0cmで非砕波領域の波である。また，波力測定と同時に，模型周辺領域の境界層の状態，渦の発生を染料により目視および写真観測を行った。

2.3.3　実験結果とその考察

a．実験結果

観測結果の代表的例を図2.10に示す。図2.10．(i)は，染料の写真観測で円柱表面での境界層のハク離のない状態における波および波力の記録である。この場合には波高最大の位相と鉛直力F_Vの最大値が対応し，水平力F_Hは$T/4$（位相角$\pi/2$）遅れる。すなわち水粒子運動の加速度の大きさにF_H，F_Vは比例して生じている。

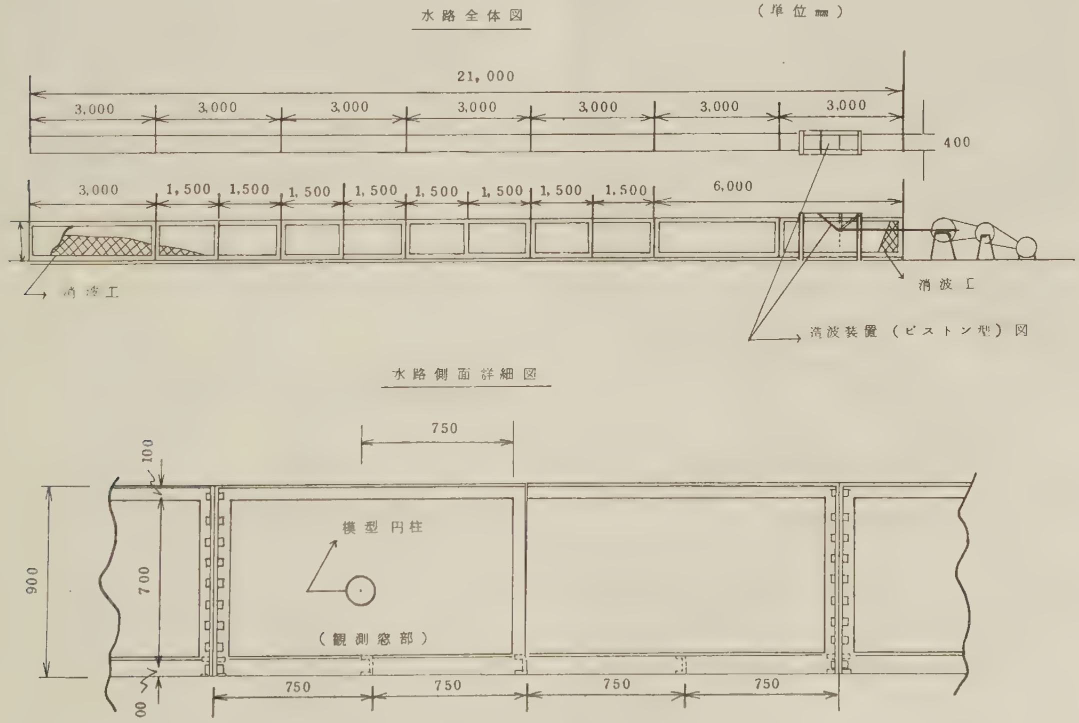
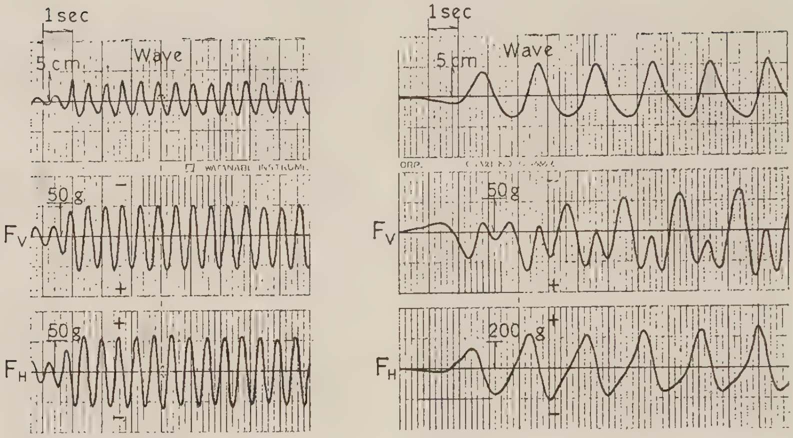

水路全体図
（単位 mm）
21,000
3,000
3,000
3,000
3,000
3,000
3,000
3,000
400
3,000
1,500
1,500
1,500
1,500
1,500
1,500
1,500
1,500
6,000
消波工
消波工
造波装置（ピストン型）図
水路側面詳細図
750
100
900
700
模型円柱
（観測窓部）
100
750
750
750
750

図 2.9　実 験 水 路

Wave tank



i) H=5.40 cm　T=0.59 sec
K.C=0.15　Re=2.45×10^3

ii) H=9.47 cm　T=1.91 sec
K.C=3.54　Re=1.79×10^4

Example DATA
D=11.5　h=40　s=20　(cm)

図 2.10　実　験　値
Example DATA

これに対し図2.10.(ii)は円柱の後流域に渦の発生の見られた場合の記録である。この場合の F_H の最大値は前記のハク離のない場合が波の位相と精度高く位相角 $\pi/2$ とおくれて一致しているのに対し，図2.10.(ii)では位相角 $\pi/2$ をわずかにずれた位置で生じている。これは後流域による抗力が生じた領域であることがわかる。また F_V の記録には波周期より高周波成分が合成されており抗力，慣性力の他に揚力が現れていることがうかがえる。

以上の記録に見るように抗力の発生は現象的には境界層のハク離と密接に関係があることが判る。これは抗力がハク離境界層によって後流中に運び出される運動量によって形成されていることと対応する。ハク離に関連する無次元定数に（K.C）数（クーリガン・カーペンター数）がある。これは水粒子の流程を示す量 $u_{max}T$ と円柱の直径Dとの比で示され，

$$K.C.\text{数}=\frac{u_{max}\,T}{D}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot49)$$

この値が $\pi C_M/(2C_D)$ 以上になればハク離が起る。

b.　慣性力の理論解と実験値の比較

慣性力は安全流体でも存在する力であるからポテンシャル理論を用いて検討される。Blasius はx，y方向の流体力 F_x，F_y が次式で与えられることを示した。

$$\left.\begin{aligned}&F_x+iF_y=-i\rho\oint\frac{\partial\Phi}{\partial t}dz+\frac{i\rho}{2}\oint\left(\frac{dw}{dz}\right)^2dz\\&z=x+iy\\&z=x-iy\\&W=\Phi+i\Psi\end{aligned}\right\}(2\cdot50)$$

ここに，Φ；速度ポテンシャル

Ψ；流れ関数

この式で$W=f(z)$が与えられれば F_x，F_y を求めることができる。図2.11に示すように底面からSだけ離れた円柱（半径a）が運動する場合の複素ポテンシャルWは，Müller W.36) によって

$$\left.\begin{aligned}&W=-iva^2\sum_{j=0}^{\infty}mj\left[\frac{1}{z-i(S-aq_j)}-\frac{1}{z+i(S-aq_j)}\right.\\&\text{ここに}\ m_n=q_1{}^2,\ q_2{}^2,\ q_3{}^2\cdots\cdots q_n{}^2\\&m_0=1\\&q_n=\frac{1}{\dfrac{2S}{a}-q_n-1}q_0=0\end{aligned}\right\}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot51)$$

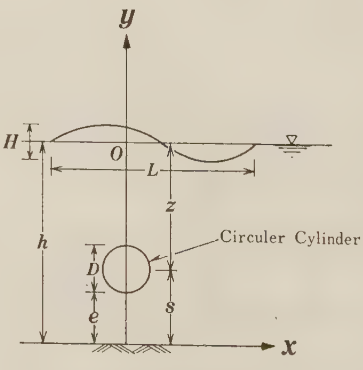


図 2.11　座　標　系
Coordinate System

ここに，vは円球の振動速度，aは円柱の半径，Sは円柱の中心から Botton までの距離を示す。

この値を（2・50）式に代入して，Yamamoto & Nath³⁷⁾ は壁に平行に運動する円柱について，

$$\left.\begin{aligned} F_H &= -\rho\pi a^2 C_{MA}\dot{U} \\ F_V &= \rho a C_L U^2 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot52)$$

ここに

$$C_M = C_{MA}+1 = 2\left(\sum_{j=1}^{\infty} m_j{}^2\right)$$

$$C_L = -4\pi\sum_{j=0}^{\infty}\ \sum_{k=0}^{\infty}\frac{m_j\cdot m_k}{\left(\dfrac{2S}{a}-q_j-q_k\right)^3}$$

但し $S>a$

を得ている。

この式を用い慣性力係数 $C_M(=1+C_{MA})$ について求めた値を図（2.12）中の実線で示す。図中には実測値をプロットした。図中鉛直方向のC_Mは水平方向のC_Mに対しバラツキが大きいが，これは慣性力の絶対値が小さく水平成分に比し精度が悪くなることと，揚力の影響が複雑に関係するためであろう。

図からe $D>1$ で $C_M=2.0$ として十分であることが判る。

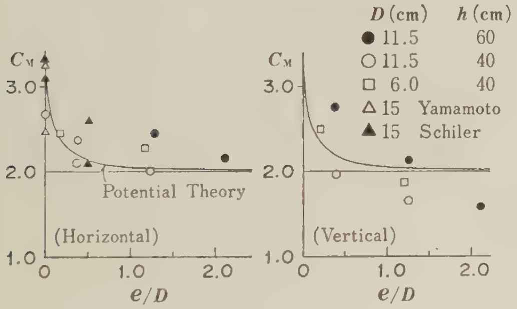


図 2.12　C_M と eD

C_M and e/D

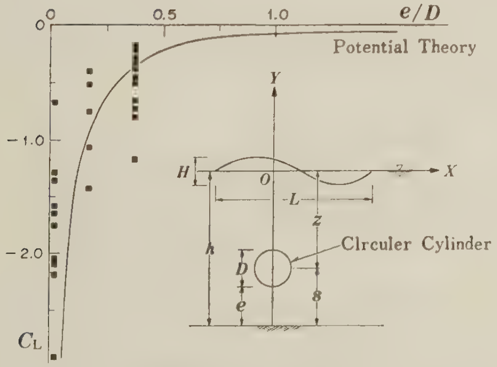


図 2.13　e/D と C_L

Correlation between e/D and C_L

揚力係数 C_L については図2.13 に計算値および実測値を示す。

また Müller による (2・51) 式は 2 重湧口におけるΦ, Ψを壁上で $\Psi=0$ の条件を満たして求められるから直径 D の部材が $2e$ の 間隔で流れに直角に存在するときの問題に拡張することができる。

c. 慣性力の支配領域の考察

本章の(1)節 (2.47) 式で慣性力の支配域が $\beta>1$, $\beta=F_M/(2F_D)$ であることが導かれた。これについて先ず考察してみる。（2・41）式を円柱の場合に用いれば

$$\left.\begin{aligned} \beta &= \frac{2\pi C_M V w_0 u_m}{gT}\cdot\frac{g}{C_D A w_0 u_m{}^2} \\ &= \frac{\pi^2 C_M a}{C_D u_m T} = \frac{\pi^2 C_M}{2C_D(K.C.)} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(2\cdot53)$$

ここに

$$(K.C.) = \frac{u_m T}{D}$$

である。従って $\beta>1$ は $(K.C.)$ 数で示せば

$$(K.C.) < \frac{\pi^2 C_M}{2C_D} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot54)$$

であり，円柱における $C_D=1.0$, $C_M=2.0$を用いれば

$$(K.C.) < \pi^2 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot55)$$

であれば抗力は省略され慣性力のみを考えればよいことになる。すなわち $\beta>1$ のもつ物理的な意味は $(K.C.)$ 数がπ^2 より小すなわち，波運動による水粒子の移動経路長が小さくて（$\leqq 2\pi D$）境界層はハク離の生じない場合である。

部材間隔 $2e$ や，海底に近い距離 e にある部材の慣性力の支配領域は（2・51），（2・52）式から，限界 $(K.C.)$ 数として，

$$\left.\begin{aligned} &(K.C.)_C < \frac{\pi^2\left(1+\sum_{j=1}^{\infty} m_j{}^2\right)}{C_D} \\ &m_j\text{：（2・51）式による値} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\cdot56)$$

で与えることができる。

3.　垂下式養殖施設に関する研究

3.1　はしがき

従来，カキ，ホタテ，真珠など養殖期間中の生育管理を必要とする有用水産生物は，筏式養殖施設が用いられてきた。又，養殖場は湾内，島影など天然の地形を利用し，波の静穏な海域を漁場として用いられてきたが，漁場の拡大，沿岸域の漁場汚染の連行に伴ない，漁場の沖合化が進められつつある。漁場の沖合化は必然的に波，

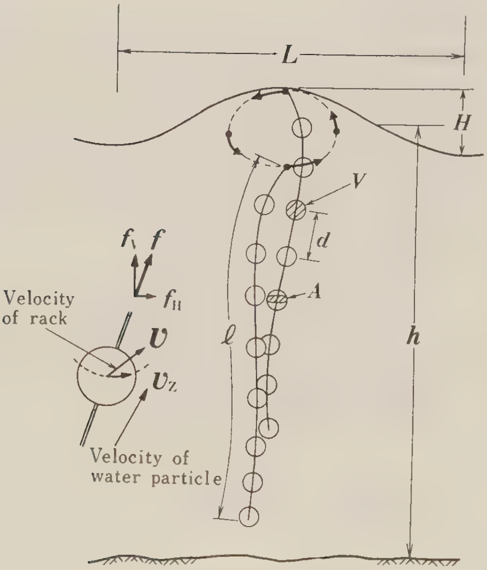


図 3.1　垂下連の波による運動
Motion of the hanging rack line in wave

流れなどに対する施設の耐波，耐流施設が要求される。しかしながら，従来施設の設計は経験的に行われてきたために，外力としての波，流れなどに対し安全である施設の設計法は確立されていない。筏式養殖施設は，所定の海域，水深に養殖物を保持するために，木材，竹材又は鋼管で枠組された筏台部と，その枠組に上部を固定された垂下連，筏台部を海面上に保持するための浮子及び所定海域に固定するための係留部で構成される。なお筏台部は，養殖期間中の生育管理作業基地として重要な役割を果している。

本章では，筏式養殖施設の設計外力，特に波力により垂下連に生じる張力について理論的に解明し，模型実験により検証した結果について述べる。

3.2　垂下連に働らく波力

3.2.1　理　論

垂下連の波による運動を模式的に示したのが図3.1である。垂下連の運動方程式は，図中の記号を用いて示すと（1・1）式から，

$$\frac{\sigma_G V}{g}\dot{\boldsymbol{v}}=\boldsymbol{f}-\frac{(\sigma_G-w_0)}{g}V\cdot\frac{\partial\Omega}{\partial S}-C_D A\frac{w_0}{2g}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_Z)$$

$$|\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_Z|-\frac{w_0}{g}C_{MA}V(\dot{\boldsymbol{v}}-\dot{\boldsymbol{v}}_z)+\frac{w_0}{g}V\dot{\boldsymbol{v}}_Z\cdots\cdots(3\cdot1)$$

ここに，σ_G，w_0は養殖物と海水の単位体積重量（$w_0=\rho g$），V，Aは養殖物1塊の容積及び流れに直角な射影面積，gは重力の加速度，$\boldsymbol{v}_Z$, $\dot{\boldsymbol{v}}_Z$は水深Cの位置における水分子の移動速度及び加速度，$\boldsymbol{v}$, $\dot{\boldsymbol{v}}$は垂下体の運動速度と加速度，Ωは重力ポテンシャル，C_D, C_{MA}は抗力係数及び付加質量係数，$\boldsymbol{f}$は垂下ロープ張力である。

a.　垂下連に加わる鉛直力

水深zの位置にある養殖塊1コによって垂下ロープに加わる力の鉛直方向成分f_vは，ロープ上端の鉛直運動が表面($z=0$)の水粒子の運動と一致するとして，添字$_s$を付して表わすと（3・2）式となる。

$$f_v=\frac{\sigma_G}{g}V\dot{w}_s+C_D A\frac{w_0}{2g}(w_s-w_z)^2+C_{MA}V$$

$$\frac{w_0}{g}(\dot{w}_s-\dot{w}_z)-\frac{w_0}{g}V\dot{w}_z+(\sigma_G-w_0)V$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot2)$$

一方，波の運動に微小振幅波理論を適用すると，水粒子の移動速度及び加速度は（3・3）式で示される。

$$\left.\begin{aligned}
w_z&=\frac{\sigma H}{2}\cdot\frac{\sinh(h+z)}{\sinh kh}\cos(kx-\sigma t)\\
\dot{w}_z&=\frac{\sigma^2 H}{2}\cdot\frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh}\sin(kx-\sigma t)\\
w_s&=-\frac{\sigma H}{2}\cos(kx-\sigma t)\\
\dot{w}_s&=-\frac{\sigma^2 H}{2}\sin(kx-\sigma t)
\end{aligned}\right\}(3\cdot3)$$

ここにHは波高，Tは波の周期，Lは波長，hは水深，xは波の進行方向座標，zは静水面上から上向きの方向にとった距離，tは時間，kは波数（$=2x/L$），σは角周波数（$=2\pi/T$），（3・3）式を（3・2）式に代入して整理すると（3・4）式となる。

$$f_v=\frac{w_0}{g}V\left\{\left(\frac{\sigma_G}{w_0}+C_{MA}\right)\dot{w}_s-C_M\dot{w}_z\right\}$$

$$+\frac{w_0}{2g}C_D A(w_s-w_z)^2+(\sigma_G-w_0)V$$

$$=-\frac{w_0}{g}V\cdot\frac{\sigma^2 H}{2}\left[\left(\frac{\sigma_G}{w_0}+C_{MA}\right)-C_M\frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh}\right]$$

$$\sin(kx-\sigma t)+\frac{w_0}{2g}C_D A\frac{\sigma^2 H^2}{4}\left(1-\frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh}\right)^2$$

$$\cos^2(kx-\sigma t)+(\sigma_G-w_0)V\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot4)$$

いま，

$$S_z=1-\frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh}$$

とおくと（3・4）式は

$$f_v=-\frac{w_0}{g}V\cdot\frac{\sigma^2 H}{2}\left[\left(\frac{\sigma_G}{w_0}+C_{MA}\right)-C_M(1-S_z)\right]$$

$$\sin(kx-\sigma t)+\frac{w_0}{2g}C_D A\frac{\sigma^2 H^2}{4}\cdot S_z{}^2\cdot\cos^2(kx-\sigma t)$$

$$+(\sigma_G-w_0)V$$

となる。ここで$C_M=C_{MA}+1$の値で慣性力係数である。

また，

$$\left.\begin{aligned} M_z&=\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left[\frac{\sigma_G}{w_0}+C_M S_z-1\right]\\ D_z&=\frac{\pi^2 w_0 C_D A H^2}{2gT^2}\cdot S_z^2 \end{aligned}\right\}\cdots(3\cdot5)$$

とおくと（3・4）式は

$$f_v=-M_z\ \sin(kx-\sigma t)+D_z\cos^2(kx-\sigma t)$$
$$+(\sigma_G-w_0)V\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot6)$$

となる。f_v の最大値は，$df_v/dt=0$, $d^2f_v/dt^2|_{t=t_1}<0$ の時に生じる。ここに，t_1は$df_v/dt=0$ の解である。（3・6）式を微分すると，

$$\frac{df_v}{dt}=\sigma M_z\ \cos(kx-\sigma t)+D_z 2\sigma\cos(kx-\sigma t)\sin(kx-\sigma t)$$
$$=\sigma\cos\ (kx-\sigma t)\{M_z+2D_z\sin(kx-\sigma t)\}=0$$

となり，

$$\left.\begin{aligned} &\cos(kx-\sigma t)=0\\ &\text{あるいは}\\ &M_z+2D_z\sin(kx-\sigma t)=0 \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot7)$$

で極値をとる。一方

$$\frac{d^2f_v}{dt^2}=\sigma^2 M_z\ \sin(kx-\sigma t)-2\sigma^2 D_z\ \cos 2(kx-\sigma t)$$

（3・7）式の第1式から，$\theta=kx-\sigma t=\pi/2$，$3\pi/2$，このとき

$$\theta=\frac{\pi}{2}\text{で}\frac{d^2f_v}{dt^2}=\sigma^2 M_z+2\sigma^2 D_z>0$$

$$\theta=\frac{3\pi}{2}\text{で}\frac{d^2f_v}{dt^2}=-\sigma^2 M_z+2\sigma^2 D_z<0$$

となる。故に$M_z>2D_z$のとき，$\theta=3\pi/2$ で最大となる。（3・7）式の第2式から

$$\sin(kx-\sigma t)=-\frac{M_z}{2D_z}\text{を用いると}$$

$$\frac{d^2f_v}{dt^2}=-\frac{\sigma^2 M_z^2}{2D_z}-\sigma^2\left(2D_z-\frac{M_z^2}{D_z}\right)<0$$

となる。

よって，$M_z\leqq 2D_z$の時，$\theta=\sin^{-1}(-M_z/(2D_z))$ で最大となる。即ち（3・6）式で示される鉛直力f_v の最大値は，

$$\left.\begin{aligned} &M_z\leqq 2D_z\ \text{のとき}\\ &f_v=\frac{M_z^2}{2D_z}+D_z\left(1-\frac{M_z^2}{4D_z^2}\right)+(\sigma_G-w_0)V\\ &M_z>2D_z\ \text{のとき}\\ &f_v=M_z+(\sigma_G-w_0)V \end{aligned}\right\}(3\cdot8)$$

で示される。

（3・8）式を1本の垂下連長 l について合計し，1本の垂下連に加わる最大鉛直張力（F_V）を求める。この場合（3・7）式の第1，第2式の判別条件，$M_z\gtreqless 2D_z$ は各水深によって異なるが，(w_s-w_z)，$(\dot{w}_s-\dot{w}_z)$ は連の最下端で最大となるので $z=-l$ で判別すると，1本の垂下連最大鉛直張力（F_V）は，（3・9）式となる。

$$\left.\begin{aligned} &M_l\leqq 2D_l\ \text{のとき}\\ &F_V=\sum_1^n f_v=\frac{M_l}{2D_l}\sum_1^n M_z+\left(1-\frac{M_l^2}{4D_l^2}\right)\\ &\quad\times\sum_1^n D_z+w'\\ &M_l>2D_l\ \text{のとき}\\ &F_V=\sum_1^n M_z+w' \end{aligned}\right\}(3\cdot9)$$

ここに，$M_l=M_{z=l}$, $D_l=D_{z=l}$, w' は1本の垂下連の全水中重量，nは1本の垂下連の養殖塊の個数

ここで，

$$\sum_1^n M_z=\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{n\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\sum_1^n S_z\right\}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot10)$$

$$\sum_1^n S_z=\frac{l}{d}\sum_1^n S_z d_z=\frac{l}{d}\int_{-l}^0 S_z dz=\frac{h}{d}\left[\frac{l}{h}\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2\pi h/L}\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}-\frac{\cosh\ 2\pi(h-l)/L}{\sinh\ 2\pi h/L}\right\}\right]\equiv\alpha$$
$$\cdots\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot11)$$

$$\sum_1^n D_z=\frac{\pi^2 C_D A w_0 H^2}{2gT^2}\sum_1^n (S_z)^2\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot12)$$

$$\sum_1^n (S_z)^2=\frac{l}{d}\int_{-l}^0 S_z^2\cdot dz=\frac{h}{d}\left[\frac{l}{h}-\frac{2}{2\pi h/L}\right.$$
$$\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}-\frac{\cosh\ 2\pi(h-l)/L}{\sinh\ 2\pi h/L}\right\}$$
$$\left.+\frac{\frac{1}{4\pi h/L}\left\{\sinh\ \frac{4\pi h}{L}-\sinh\frac{4\pi}{L}(h-l)\right\}-\frac{l}{h}}{\cosh(4\pi h/L)-1}\right]\equiv\beta$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot13)$$

（3・5）式からの $S_l(S_{z=l})$，（3・11)，（3・12）式を（3・9）式に代入すると（3・9）式は，（3・14）式となる。

$$\left.\begin{aligned} &M_l\geqq 2D_l\ \text{のとき}\\ &F_V=\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)\right.\\ &\quad\left.+C_M\alpha\right\}+w'\\ &M_l<2D_l\ \text{のとき}\\ &F_V=\frac{M_l}{2D_l}\cdot\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)\right.\\ &\quad\left.+C_M\alpha\right\}+\left(1-\frac{M_l^2}{4D_l^2}\right)\frac{\pi^2 C_D\beta A w_0 H^2}{2g\ T^2}\\ &\quad+w' \end{aligned}\right\}(3\cdot14)$$

（3・14）式は，1本の垂下連に加わる最大鉛直張力を示す。

b．垂下連に加わる水平力

波運動による垂下連の水平運動は，波による水粒子の水平運動より小さいため（3・15）式が成り立つ。

$$\left.\begin{array}{l}|u_z|>|u|\\ |u_z-u|_{max}<|u_z|_{max}\\ \left[\dfrac{\partial}{\partial t}(u_z-u)\right]_{max}<\dot{u}_z\end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot15)$$

ここに，u，u_z は水深 z における養殖塊の水平方向運動速度及び水粒子の水平方向移動速度，$\dot{u}_z$は水粒子の水平方向の加速度，いま，潮流速U_0に波による水粒子の移動速度u_zが重なるとして，波の理論に微小振幅波理論を用いるとu_zは，

$$\left.\begin{array}{l}u_z=U_0+\dfrac{\sigma H}{2}\cdot\dfrac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh}\sin(kx-\sigma t)\\ \quad\equiv U_0+u_{zm}\sin\theta\\ u_{zm}=\dfrac{\sigma H}{2}\cdot\dfrac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh},\ \theta=kx-\sigma t\end{array}\right| \cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot16)$$

となる。（3・16）式を（3・1）式に代入し，（3・15）式の関係を考慮すると大き目の値として（3・17）式を得る。

$$f_H\leqq\frac{w_0}{g}V\left(\frac{\sigma G}{w_0}-C_M\right)\dot{u}_z+\frac{w_0}{2g}C_DAu_z^2$$

（3・17）式中右辺第1項は，垂下連上端の係留の仕方によって影響を受け，係留索のタルミがなくなった場合の衝撃力の発生に大きく影響するが，一般に最大張力の発生時には係留索をたるませる方向に作用するのでこの項を無親すると，

$$f_H\leqq\frac{w_0}{2g}C_DA(U_0+u_{zm})^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot18)$$

で与えられる。1本の垂下連に加わる水平力（F_H）は，式（3・18）を合計して，（3・19）式で求められる。

$$\begin{aligned}F_H&=\sum_1^n f_H=\frac{w_0}{2g}C_DA\left[nU_0^2+2U_0\sum_1^n u_{zm}+\sum_1^n u_{zm}^2\right]\\ &=\frac{w_0}{2g}C_DA\left[\frac{l}{d}U_0^2+\frac{LHS_l}{Td}U_0+\frac{\pi^2H^2}{T^2}\cdot\frac{h}{d}S_u\right]\end{aligned} \cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot19)$$

（3・19）式中，S_uは（3・20）式の値をとる。

$$S_u=\sum_1^n u^2_{zm}=\frac{\dfrac{1}{4\pi h/L}\left\{\sinh\dfrac{4\pi h}{L}-\sinh\dfrac{4\pi}{L}(h-l)\right\}+\dfrac{l}{h}}{\cosh(4\pi h/L)-1}$$

3.2.2 模型実験

a. 実験装置と実験波

模型実験に用いた水槽は，長さ25m×幅1.5m×水深2.5mの造波水槽で，一端にフラッタ型の造波機が，他端にはサンフレックスを塡充した消波装置が取り付けられている。用いた実験波の範囲は，波高H=7.0cm〜28.0cm，周期T=1.0〜2.6sec，波長L=2.0〜10mであ

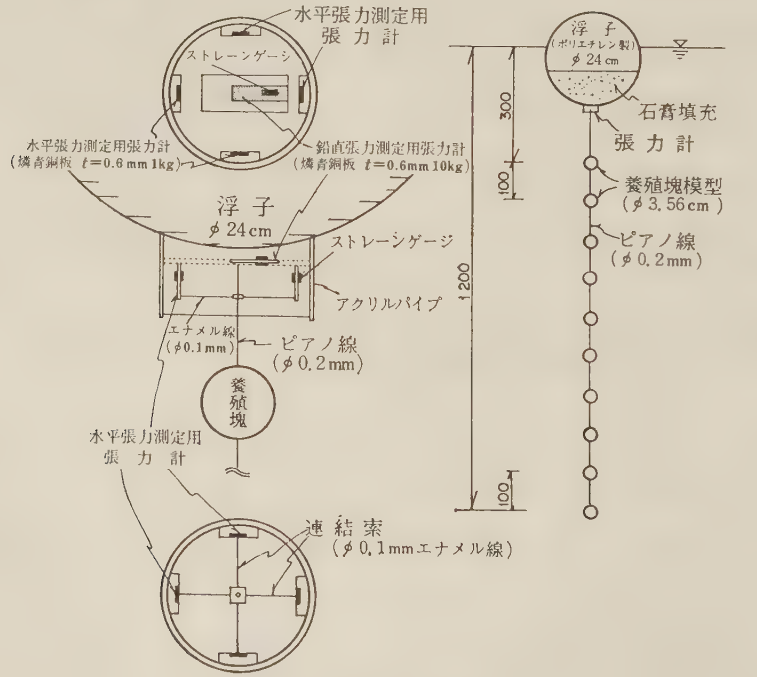

水平張力測定用
張力計
ストレーンゲージ
水平張力測定用張力計
（燐青銅板 t=0.6mm 1kg）
鉛直張力測定用張力計
（燐青銅板 t=0.6mm 10kg）
浮子
φ24cm
ストレーンゲージ
アクリルパイプ
エナメル線
（φ0.1mm）
ピアノ線
（φ0.2mm）
養殖塊
水平張力測定用
張力計
連結索
（φ0.1mmエナメル線）
浮子
（ポリエチレン製）
φ24cm
石膏塡充
張力計
養殖塊模型
（φ3.56cm）
ピアノ線
（φ0.2mm）
300
100
1200
100

図 3.2 張力計及び垂下連模型

Tension meter and mode of the hanging rack line

る。

b. 垂下張力測定器と垂下体模型

垂下連の索に働く張力の測定は，図3.2に示すような鉛直，水平分力の測定可能な張力計を製作し，浮子の下端に取付けた。垂下体模型は，一個の養殖塊に直径$D=3.56\mathrm{cm}$のピンポン玉の中に密度$\sigma_0=2.20g/\mathrm{cm}^3$のガラス玉を塡充したものを用い，図3.2に示すように，10コの模型養殖塊（ピンポン玉）を中心間隔10cmとなるようにϕ0.2mmのピアノ線で連結したものを用いた。模型養殖塊の見かけの単位体積重量（σ_G）および容積（V）は1本の垂下連を製作後，連全体の空中重量（w），水中重（W'）量を測定し，（3・21）式により，算出した。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_G&=\frac{w_0W}{W-W'}\\ V&=W/(10\times\sigma_G)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\cdot21)$$

ここに，w_0は水の単位体積重量（g/cm³）である。その結果，$\sigma_G=2.15g/\mathrm{cm}^3$，$V=23.71\mathrm{cm}^3$を得た。垂下体を水中の所定の水深に保持する浮子は，ϕ24cmのポリエチレン製のものを用いた。又，浮子が波形を横揺れなく追随するように，浮子の内側下部に石膏を塡充した。その時浮子の余剰浮力は，約3.0kgであった。

3.2.3 実験結果とその考察

実験波の諸元は，容量式波高計2本を用い，1本を浮子の位置に他の1本を波長測定のために1.50m離れた位置に設け，ペン書きオシログラフの記録から波高H，波長L，周期Tを読取った。又，各実験波毎に鉛直方向張力F_Vは，図3.2に示す張力計を用いて測定したもので，波の記録と同時にペン書きオシログラフに記録した。図3.3は，垂下連の波による変動張力の測定結果の代表的例を示したものである。1段目は，垂下連の鉛直変動張力を，2段目はその時の波形を示す。図3.3からわかるように波の峯すなわち波の水粒子の鉛直加速が最大の点で張力の垂直変動力の最大を生じる。また，波面が上昇する時，垂下体張力の鉛直成分も増加し，波面が下降する時，垂下体張力の鉛直成分は減少する。このことは，波面の下降の際，垂下体は重力の作用によりスムーズに下降し，垂下連をたるませる方向に流体力が作用していることを示していて，理論での仮定を実証している。

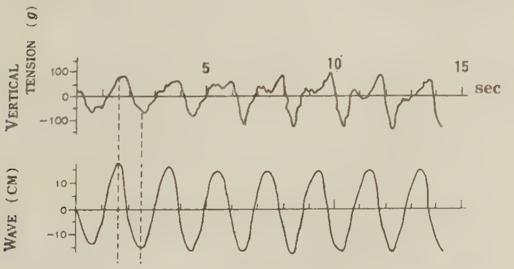


図　3.3　垂下連の鉛直変動張力と水平変動張力の記録例

Experimental records of the hanging rack line tension by wave

図3.4は，理論計算値と鉛直方向張力の実測値を対比して示したものである。縦軸の理論値は，（3・14）式を用いて各実験毎の測定した波の諸元(波高，波長，周期)及び$\sigma_G=2.15g/\mathrm{cm}^3$，$w_0=1.00\mathrm{g/cm}^3$，$V=23.71\mathrm{cm}^3$，$l=1.30\mathrm{m}$，$h=2.5\mathrm{m}$，$d=10.0\mathrm{cm}$，$C_{MA}=0.5$を代入して求めたものである。図3.4は，少しのバラツキはあるが，計算値と実測値がほぼ一致していることを示す。このバラツキは，実験の性格上浮子の運動が水粒子の運動と完全に一致しないこと，又，周期Tが短くなるにつれ浮子の横揺れが生じたためと考えられる。以上のことを考慮すると（3・14）式は，垂下連の鉛直力算定に充分供し得る。

3.3 筏式養殖施設に加わる外力基準化(試案)

筏式養殖施設は

① 養殖籠又は付着基質など養殖物を所定の水深に保持する垂下連
② 垂下連を所定の海域に保持する筏台部
③ 筏を所定の海域に保持する係留，アンカー部

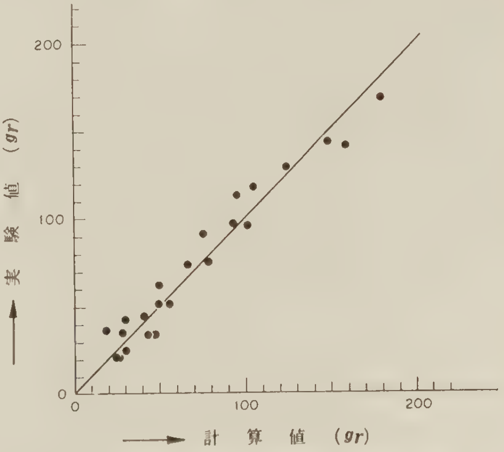


図　3.4　垂下連張力の実験値と計算の比較

Comparion of the experimental values with caluculated values of hanging rack line vertical tension

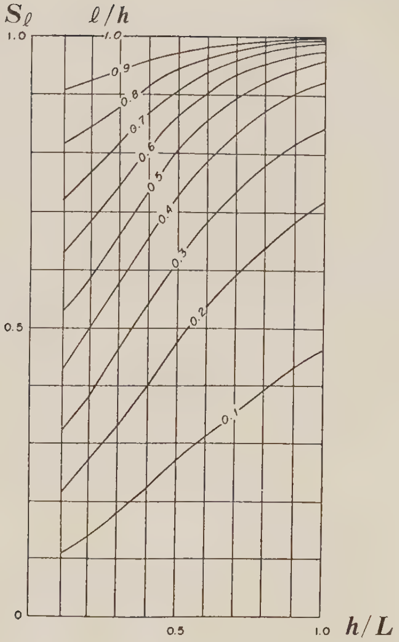


図 3.5 S_l の値

Values of S_l

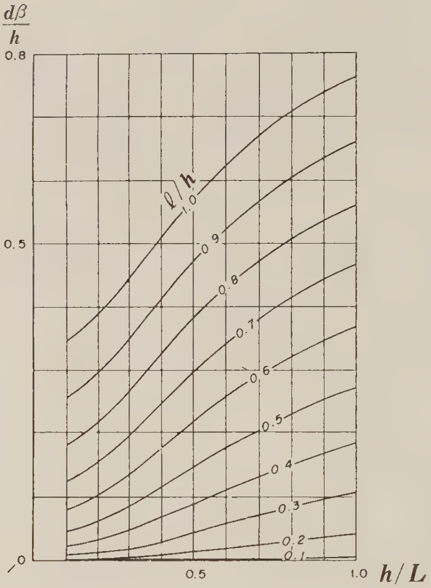


図 3.7 β の値

Values of β

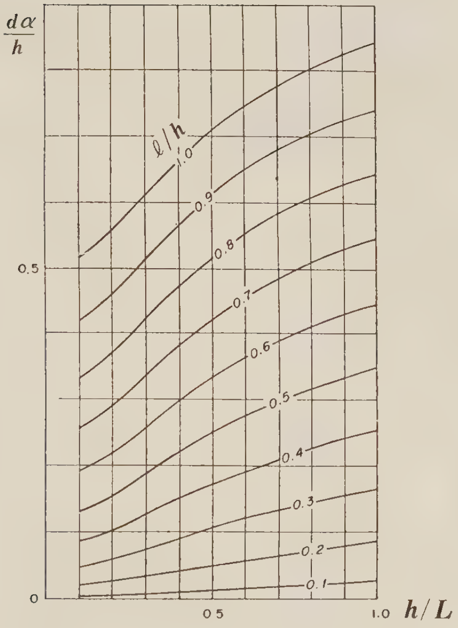


図 3.6 α の値

Values of α

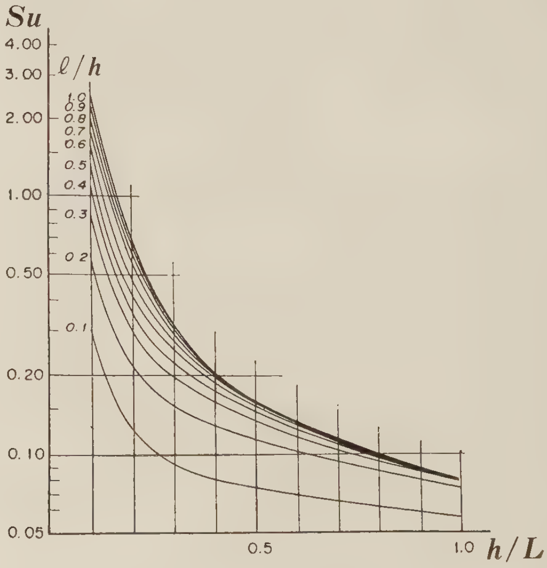


図 3.8 S_u の値

Values of S_u

で構成される。

3.3.1　波により垂下連に生じる鉛直張力

波の波高 H，波長 L，周期 T，垂下連の長さ l，垂下連を構成する養殖塊の取付け間隔 d，単位体積重量 σ_G，1個の養殖塊の代表的断面積 A，容積 V，設置水深 h，海水の単位体積重量 w_0 とすると，垂下連の1本の頂部に生じる張力は（3・22）式で求められる。

$$\left.\begin{aligned}&M_l>2D_l \text{ ととき}\\&F_V=\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\alpha\right\}+w'\\&M_l\leqq 2D_l \text{ のとき}\\&F_V=\frac{M_l}{2D_l}\ \frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\alpha\right\}\\&\quad+\left(1-\frac{M_l^2}{4D_l^2}\right)\cdot\frac{\beta\pi^2 C_D A w_0 H^2}{2gT^2}+w'\end{aligned}\right\}$$

…………（3・22）

ここで，w' は1本の垂下連の水中重量，M_l, D_l, S_l, は，（3・23）式でα，βは，（3・24）式で示される。

$$\left.\begin{aligned}&M_l=\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left[\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M S_l\right]\\&D_l=\frac{\pi^2 w_0 C_D A H^2}{2gT^2}\cdot S_l^2\\&S_l=1-\frac{\sinh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L}\end{aligned}\right\}\quad（3・23）$$

$$\left.\begin{aligned}&\alpha=\frac{h}{d}\left[\frac{l}{h}-\frac{1}{2\pi h/L}\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}\right.\right.\\&\qquad\left.\left.-\frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L}\right\}\right]\\&\beta=\frac{l}{d}\left[\frac{l}{h}-\frac{2}{2\pi h/L}\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}\right.\right.\\&\qquad\left.\left.-\frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L}\right)\right]+\frac{h}{d}\\&\times\left[\frac{\frac{1}{4\pi h/L}\left\{\sinh\frac{4\pi h}{L}-\sinh\frac{4\pi(h-l)}{L}\right\}-\frac{l}{h}}{\cosh(4\pi h/L-1)}\right]\end{aligned}\right\}$$

…………（3・24）

なお，S_l，α，β はグラフ化され，図3.5，図3.6，図3.7に示される。式中，抗力係数C_D，付加質量係数C_{MA}は，表2.2による。

3.3.2　1本の垂下連に働く最大水平力

垂下連に働く水平力（F_H）は，潮流速U_0に波運動による水粒子の移動速度u_zが加わったものとして，（3・25）式より求める。

$$F_H=\frac{C_D A w_0}{2g}\left[\frac{l}{d}U_0^2+\frac{LHS_l}{Td}U_0+\frac{\pi^2 H^2}{T^2}\cdot\frac{l}{d}S_u\right]$$

…………（3・25）

ここで，S_uは（3・26）式，図3.8による。

$$S_u=\frac{\frac{1}{4\pi h/L}\left\{\sinh\frac{4\pi h}{L}-\sinh\frac{4\pi}{L}(h-l)\right\}+\frac{l}{h}}{\cosh(4\pi h/L)-1}$$

…………（3・26）

3.3.3　筏梁材の使用断面の決定

垂下連を所定の水深に保持するための筏は，通常海面上に保持されているため，支点である浮子の不等沈下を考えた連続梁として計算するべきであるが，不等沈下量の見積りが困難であるため，実用上は浮子を支点とした単純梁として（3・27）式，（3・29）式で求める。

a．横梁材に生じる最大曲げモーメント

1本の横梁材に生じる最大曲げモーメントは

$$M=\frac{1}{4}n\cdot F_V\cdot a\quad\cdots\cdots\cdots\cdots（3・27）$$

ここで，M：横梁材の最大曲げモーメント，n：横梁材 a 区間に垂下される垂下連本数，a：浮子で支持された縦主梁材間隔，F_V：1本の垂下連に加わる鉛直力，（3・22）式で求まる値。

b．縦主梁材に生じる最大曲げモーメント

筏は浮子間を縦主梁材で結合され，その縦主梁材を垂下連が吊り下げられている横梁材で連結されている。そのため，4個の浮子で囲まれた垂下連に働く鉛直力は，横梁材を通じて縦の主縦材に伝達され，浮子を支点とする梁構造となっている。縦，横の主梁材に加わる荷重をq_1，q_2，縦主梁材間隔をa，横主梁材間隔をbとおくと，q_1，q_2は歪方程式を解いて求まるが，梁材の剛度が等しい場合，近似的に（3・28）式で求まる。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{q_1}{q}=\frac{a^2}{a^2+b^2}\\&\frac{q_2}{q}=\frac{b^2}{a^2+b^2}\\&q=n\times n'\times F_V\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots（3・28）$$

ここで，n：横梁材 b区間の垂下連本数，n'：縦主梁材 a 区間の横梁材の本数，縦，横主梁材の曲げモーメント M_a，M_bは，式（3・29）で求める。

$$\left.\begin{aligned}&M_a=\frac{1}{4}q_1 a\\&M_b=\frac{1}{4}q_2 b\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots（3・29）$$

c．梁材の断面決定

主梁材の断面は，

$$\sigma=\frac{M}{Z}<\sigma_a$$

を満足するように定める。σ, Mは部材に生じる応力及び曲げモーメントで，Z は断面の形状により求まる断面係数（円筒管の場合，円筒の外直径を D，内直径をdとし $Z=\pi(D^4-d^4)/32D$，円柱の場合，円柱の直径をDとし

て$Z=\pi D^3/32$)である。σ_aは，材料の許容応力である。

3.3.4 浮子の大きさ

浮子は，筏台部を海面上に保持する大きさとする。浮子1個の持つべき浮子（F_u）は（3・30）式から求める。

$$F_u \geqq \frac{1}{n}(\sum F_V + M) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot30)$$

ここで，n：筏1台当りの浮子の使用個数，$\sum F_V$：（3・22）式で求められる垂下連の鉛直力の1台当りの合計和，M：管理作業に必要な作業員，足場及び筏部材連結などに必要な付属物の重量の合計和。

3.3.5 筏係留索張力及びアンカーブロックの重量

筏1台当りに作用する全水平力（R）は，1本の垂下連に作用する水平力F_Hの合計和として求められ，（3・25）式を用い，（3・31）式で求まる。

$$R=\sum F_H = n\cdot F_H \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot31)$$

ここで，n：筏1台当り全垂下連本数 ,F_H：（3・25）式で求まる垂下連1本当りの水平力。係留索張力 Tは，筏の縦梁材方向前後2本で係留する場合，（3・32）式で求める。

$$T=\frac{n\cdot R\cdot L_a}{\sqrt{La^2-h^2}}\cos\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot32)$$

ここで，L_a, h：係留索長及び水深，R：（3・31）式で求まる筏1台当りの全水平力，n：前後で2本で係留される筏台数，θ：係留索方向と潮流，波向となす角。又，アンカーブロックの水平重量（W）は，（3・33）式から求める。

$$W > \frac{h}{L_a}\cdot T\left\{\mu\sqrt{\left(\frac{L_a}{h}\right)^2-1}+1\right\} \quad \cdots\cdots\cdots (3\cdot33)$$

ここで，L_a，H：前述と同じ，T：（3・32）式で求まる係留索張力，μ：アンカーブロックと底質との摩擦係数（コンクリートと岩盤，$\mu=0.5$，コンクリートと礫，$\mu=0.6$，コンクリートと砂，$\mu=0.5$）。

4. 浮施設の係留系

4.1 はしがき

従来利用されていた沿岸漁場の悪化に伴なって漁場の改善工法，造成方法の開発が急がれている。前者では湾口改良工，潮流制御工，作れいなど，水質改善を目的とした工法が種々開発されつつあり，後者では漁場の沖合化が進められている。漁場の沖合化は必然的に設置水深が大きくなると共に，施設に加わる波力が増大する。これら沖合施設に対する保全方法としては，現在以下に述べる三つの方向で開発研究が進められている。

① 浮消波工などの外郭施設を設置してその内側を漁場として利用する。

② 施設自体の耐波強度を強化する。

③ 強波浪時，施設に加わる波力の強い海表面から波力の小さくなる海水面下に施設自体を沈め，施設に加わる，波力の減少を図る。

しかし，いずれの場合にも，水深が30mから100mと深いため，これら施設を海域の所定の位置に保持するためには海底から，ロープ，チェーンを用いての係留が必要となる。

これら海面，海中に布設された浮施設の係留索には，波浪時衝撃力が発生し，往々にして係留索の切断アンカーの引かれなどによる施設の破損が見受けられた。

特に係留索の切断は，浮施設自体の破損および隣接養殖施設の二次災害の発生を伴なうため，これら浮施設の大型化，沖合化に伴なう係留索の衝撃力による索切断防止は非常に重要である。

係留索に生じる衝撃力の緩和方法は，従来一般に図4.1および以下に示すように，三つの方法が用いられてきた[44]。

① チェーン係留法

従来最も一般的に用いられてきた方法でチェーン自身の自重で衝撃エネルギーを吸収する。

② 中間シンカー係留法

この方法は，係留索の中間にシンカーを取り付け

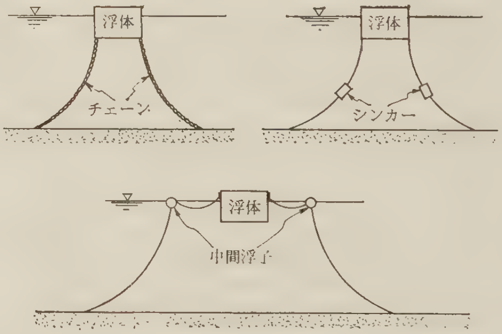


図 4 1 浮体係留法

Anchoring System of the floating bedy

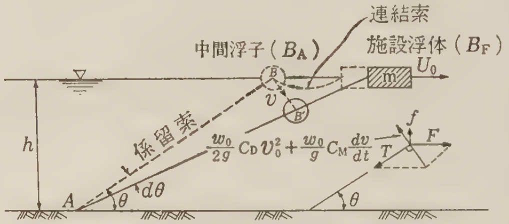


図 4.2 係留方法と作用力図

Anchoring System and acting force on anchor bouy slnking

係留索に衝撃力が作用すると中間シンカーを持ち上げる力に変換され，衝撃エネルギーを吸収する。

③　中間浮子を用いた係留法

この方法は，浮施設と係留索の間に浮子を設ける方法で，浮施設から係留索に直接作用する力を浮子で一担受け，その際浮子が海中に浮み込む時に浮子が，流体から受ける流体抵抗で衝撃エネルギーを吸収する。

①の方法は主として船舶に多く用いられ，②は浮海洋構造物に用いられている。③は水産で筏や小割生簀，定置網など他方面に利用されている。①，②はチェーンカナリーの理論として実用上十分に解析されているので本研究では水産的利用が多く，かつ理論的に未解明の③について研究する．まず③の中間浮子による衝撃緩和機構について理論的に解明し，これを模型実験により検証し中間浮子を用いた場合の係留索張力の算定法の基準化を行なう。

4.2　中間浮子の衝撃力吸収機構の理論

海面上に自由係留された浮体は波運動により強制振動し，係留索に急激に力が加わったとき係留索に衝撃力が生じる。以下で述べる方法は，衝撃力を係留索と施設浮体の中間に設置された中間浮子の浮力と移動時の流体抵抗により吸収しようとするものである。図 4.2 にその概略を示す。

図 4.2 において，施設浮体から連結索を通じて中間浮子に作用力が伝達された際，中間浮子は，その作用力により運動する。その際，

①　係留索長 (L) に対し，中間浮子の移動は微小で $d\theta \fallingdotseq 0$ と見做し得る。

②　係留索の伸びによる衝撃力吸収は無視する。

③　係留索の重量および索に働く流体抵抗は無視すると仮定する。この時，中間浮子の運動方向は中間浮子が係留索で海底に固定されているため，図 4.2 に示す v 方向に移動する。

①の仮定より

$$\angle ABB' = \angle AB'B = \angle R - d\theta/2 \fallingdotseq \angle R$$

となる。

この時，中間浮子の v 方向の運動方程式は，（1・1）式を用いて，（4・1）式で示される。ここでは（1・1）式における浮体の運動速度 U を係留索に直角方向の速度として v とかいてある。また密度は単位体積重量として $\sigma_0 = \sigma g$, $w_0 = \rho g$ としてある。

$$\frac{\sigma_0}{g} V \frac{dv}{dt} = F \sin\theta - f\cos\theta - C_D A \frac{w_0}{2g} v^2 - C_{MA} V \frac{w_0}{g} \frac{dv}{dt} \quad \cdots\cdots(4\cdot1)$$

ここに，σ_0, w_0 は中間浮子 (B_A)，海水の単位体積重量，V は B_A の容積，F は施設浮体 (B_F) と B_A の連結索に生じる力（B_A を引く方向を正），f は B_A の余剰浮力，A は B_A の v 方向の投影面積，g は重力の加速度，v は B_A の移動速度，dv/dt は B_A の加速度，θ は係留索緊張時の海底面となす角，C_D, C_{MA} は B_A の抗力係数，付加質量係数。他方，連結索緊張時施設浮体 B_F がもつ運動量は，

$$M = mu_0 = -\int_0^{\Delta T} F \cdot dt$$

で示される。ここに，m は B_F の質量と付加質量の和，u_0 は B_F の水平速度，この時施設浮体の運動量の変化量は，

$$dM = mdu = -m \cdot \sin\theta\, dv$$

となるため，施設浮体が連結索を通じて中間浮子に作用する力Fは（4・2）式となる。

$$F = \frac{dM}{dt} = -m \cdot \sin\theta \frac{dv}{dt} \quad \cdots\cdots(4\cdot2)$$

（4・2）式を（4・1）式に代入すると（4・3）式となる。

$$\Big[\left(\frac{\sigma_0}{w_0} + C_{MA}\right) V + \frac{mg \cdot \sin^2\theta}{w_0}\Big) \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_D A v^2 - \frac{g}{w_0} f \cos\theta \quad \cdots\cdots(4\cdot3)$$

いま

$$\left.\begin{aligned} &\left(\frac{\sigma_0}{w_0} + C_{MA}\right) V + \frac{mg \cdot \sin^2\theta}{w_0} = \alpha \\ &\frac{1}{2} C_D A = \beta \\ &\frac{g}{w_0} f \cdot \cos\theta = \gamma \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4\cdot4)$$

とおくと，（4・3）式は，（4・5）式となる。

$$\alpha \frac{dv}{dt} + \beta v^2 + \gamma = 0 \quad \cdots\cdots(4\cdot5)$$

（4・5）式を積分し，初期条件を $t=0$ のとき $v=v_0$ として v および dv/dt を求めると（4・6）式，（4・7）式を得る。

$$v = \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} \tan\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha} t + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} v_0\right] \cdots(4\cdot6)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\gamma}{\alpha} \sec^2\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha} t + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} v_0\right] \quad \cdots\cdots(4\cdot7)$$

よって，F は（4・7）式を（4・2）式に代入して，

$$F = \frac{m\gamma}{\alpha} \sin\theta \cdot \sec^2\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha} t + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} v_0\right] \quad \cdots\cdots(4\cdot8)$$

となる。

ここで，B_F の運動量が B_A の運動に吸収される時間を t_1 とすると，（4・2）式を用いて，

$$\int_0^{t_1} F \cdot dt = -mu_0 = -mv_0 \sin\theta \quad \cdots\cdots\cdots (4 \cdot 9)$$

で示される。（4・9）式に（4・2），（4・7）式を代入してを求めると

$$\int_0^{t_1}\left(-m \sin\theta \cdot \frac{dv}{dt}\right)dt = -mv_0 \sin\theta$$

$$\tan\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t_1 + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\,v_0\right] = 0$$

$$t_1 = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta\gamma}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\,v_0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4 \cdot 10)$$

となり，F の作用時間は

$$0 \leqq t \leqq t_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4 \cdot 11)$$

となる。

（4・11）式で示される定義域内でのの関数形状について求めると，

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{2m\gamma\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha^2}\sin\theta$$

$$\times\tan\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}v_0\right]$$

$$\times\sec^2\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t + \tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}v_0\right] \quad \cdots (4 \cdot 12)$$

ここで，

$$\frac{dF}{dt} = 0 \text{より}, \; t_0 = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta\gamma}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}v_0 = t_1$$

$$\left.\frac{d^2F}{dt^2}\right|_{t=t_0} > 0$$

よって $t<t_0$ すなわち，$t<t_1$ で F は減少関数である。

ゆえに，Fの最大値F_{max}は，$t=0$のときで，（4・13）式で示される。

$$F_{max} = \frac{m\gamma\sin\theta}{\alpha}\left[1 + \frac{\beta}{\gamma}v_0{}^2\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4 \cdot 13)$$

なおここで，$v_0 = u_0/\sin\theta$ である。

この時，係留索に生じる最大張力 T_A は，連結索に生じる最大張力 F_{max} および中間浮子に働く流体抵抗を用いて求めると以下のようである。

図4.2 に示す作用力図から，力の釣合い式は，

$$F_{max} - T_A\cos\theta - \left(\frac{w_0}{2g}C_DAv_0{}^2 + \frac{w_0}{g}C_{MA}V\frac{dv}{dt}\right)$$

$$\sin\theta = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4 \cdot 14)$$

で与えられ，（4・14）式に（4・4）式を代入すると

$$\left.\begin{aligned} T_A &= \sec\theta\{F_{max} - \sin\theta\} \\ F &= \frac{\beta w_0 v_0{}^2}{g} + \frac{\gamma w_0 C_{MA}V}{\alpha}\left(1 + \frac{\beta}{g\gamma}\right)v_0{}^2 \end{aligned}\right\} \cdots (4 \cdot 15)$$

が得られる。（4・15）式が求める係留索に生じる最大張力である。

4.3　模型実験

4.3.1　実験方法

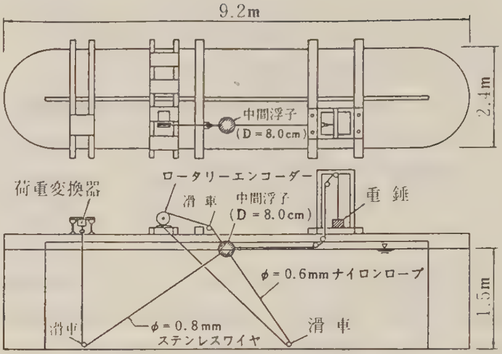


図 4.3　模型と実験水槽

Models and tank

表 4—1　実験諸元

Model values of anchoring system

中間浮子	重量　$W=108.0$gr 容積　$V=268.08\text{cm}^3$ 余剰浮力　$f=160$gr 浮子の直径　$D=8.0$cm 単位体積重量　$\sigma_0=0.403$
重量	質量　$m=500$gr，1,000gr 2,000gr，2,800gr 4,170gr，4,900gr
係留索及び連結索	φ0.8mmステンレスワイヤー
係留索張	$L=2,25\text{m}\,(\theta=41.81°)$　$L/h=1.5$ $L=3.0\text{m}\,(\theta=30°)$　$L/h=2.0$ $L=4.5\text{m}\,(\theta=19.47°)$　$L/h=3.0$
水深	$h=1.5$m
初期張力	常時　100gr

a．実験装置および模型

実験に用いた水槽は，長さ 10m，幅 1.5m，深さ 2.0 m，水深 1.5m の水槽である。実験装置は，図 4.3 に示すように，係留索の一端を水路底の滑車を介して中間浮子にとりつけた。また係留索が緊張状態で水面上に中間浮子が正常の姿勢を保持し得るように，中間浮子の反対側に連結索の他端には滑車を介して施設浮体を模した重錘をとりつけた。重錘が落下し，連結索の緊張時に発生する衝撃力が連結索を通じて中間浮子に作用する。模型実験に用いた中間浮子，重錘，係留索および係留索・水深比（L/h）の実験諸元を表 4.1 に示す。

b．計測方法

計測方法は，図 4.4 に示す通りである。係留索張力

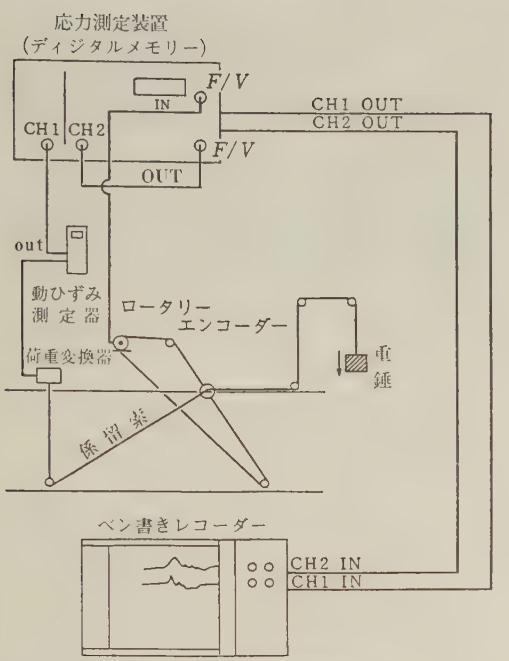


図 4.4　計測装置図
Schematic representation of Mesurering system

は，5 kgまで測定可能なひずみゲージ式変換器を用い，応答周波数0～10KHz の増幅器で増幅してディジタルメモリーの1ch側に記録させた。また中間浮子の移動・速度は最大移動速度10m/sec,応答周波数96KHz のロータリーエンコーダーを用い，ディジタルメモリーに併設された F/V 変換器を通してディジタルメモリーの2ch側に記憶させた。ディジタルメモリーは，2chの記憶部を持ち最大応答周波数は，1ch 側が 100KHz，2ch 側で 10KHz である。ディジタルメモリーに記憶させる場合のサンプリング間隔は 0.2msecで，最大記憶容量は，1024ワード/ch である。なお，係留索張力と中間浮子の移動速度を同時記録させるため，係留索張力が働き，Ch.1に記録が入った時Ch.2が作動するように，Ch.1から Ch.2 にトリガーをかけた。データの解析は，ディジタルメモリーに記録されたデータを紙テープに穿孔し，電算機を用いた。一方チェックのために各実験データをペン書きオシログラフに出力した。重錘の落下速度は，連結索緊張時の位置と重錘落下初期の位置を測定し，空中落下速度を計算した。

4.3.2　実験条件下における理論

前述 4.2 の中間浮子による衝撃力緩和理論は施設浮体が水平方向に運動する際の作用力として考えているが，本実験では施設浮体を模した重錘の運動が鉛直方向であるため重力の影響が生じそのまま適用できない。そのため図 4.2 に示す実験条件では，中間浮子に与える運動量は重錘の重力を考慮して（4・16）式で与える。

$$F=m_G-\frac{m_G}{g}\sin\theta\,\frac{dv}{dt}\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot16)$$

ここに，m_GはB_F の質量と付加質量の和を重力単位で表わしたものである。

（4・16）式を（4・1）式に代入すると

$$\left\{\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)V+\frac{m_G}{w_0}\sin^2\theta\right\}\frac{dv}{dt}+\frac{1}{2}C_DAv^2$$

$$+\frac{g}{w_0}(f\cos\theta-m_G\sin\theta)=0\cdots\cdots(4\cdot17)$$

となる。

いま

$$\left.\begin{aligned}\alpha&=\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)V+\frac{m_G}{w_0}\sin\theta\\ \beta&=\frac{1}{2}C_DA\\ \gamma&=\frac{g}{w_0}(m_G\sin\theta-f\cos\theta)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(4\cdot18)$$

とおくと（4・18）式は（4・19）式で示される。

$$\alpha\frac{dv}{dt}+\beta v^2-\gamma=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot19)$$

（4・19）式を解く際に$|v|\gtrless\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$により解は異なるが，実験では $v_0>\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$ の範囲にあることから，$|v|>\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$ の場合について（4・19）式の解を求める。

$|v|>\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$のとき（4・19）式の解は，

$$-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\ln\frac{v+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}=-\frac{\beta}{\alpha}t+C_2\cdots\cdots(4\cdot20)$$

となる。（4・20）式に初期条件，$t=0$: $v=v_0$ を代入すると，

$$C_2=-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}\cdots\cdots\cdots(4\cdot21)$$

となり，（4・20）式に（4・21）式を代入すると（4・22）式となる。

$$-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\ln\frac{v+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}$$

$$=-\frac{\beta}{\alpha}t-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}\cdots\cdots(4\cdot22)$$

（4・22）式を v について解くと，

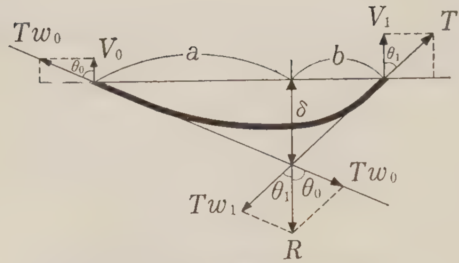


図　4.5　係留索懸垂線模式図
Model of anchor-line catenary

$$\frac{v+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}=\exp\left\{\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}+\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}\right.\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot23)$$

が得られる。いま

$$X=\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}$$

とおいてvについて解くと，（4・24）式となる。

$$v=\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\frac{\exp\left\{\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right\}+1}{\exp\left\{\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right\}-1}\quad\cdots\cdots(4\cdot24)$$

また，dv/dt は

$$\frac{dv}{dt}=-\frac{4\gamma}{\alpha}\exp\left\{\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right\}\Big/$$
$$\left[\exp\left\{\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right\}-1\right]^2\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot25)$$

となり，（4・25）式を（4・16）式に代入すると，

$$F=mG\left(1+\frac{4\gamma\sin\theta}{\alpha g}\cdot\frac{\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)}{\left\{\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)-1\right\}^2}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot26)$$

となる。

いま，F の関数系の性状について調べると次の通りである。

$$\frac{dF}{dt}=-\frac{4\gamma\sin\theta}{\alpha g\left\{\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)-1\right\}^4}$$
$$\times\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\exp\left(\sqrt{\frac{2\beta}{\alpha}}\cdot\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)$$
$$\times\left[\exp\left\{2\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)\right\}-1\right]<0\cdots(4\cdot27)$$

となり，減少関数である。

2次導関数は，

$$\frac{d^2F}{dt^2}=\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)$$
$$\times\left\{\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)-1\right\}^3$$
$$\times\left[\left[\exp\left\{2\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)\right\}-1\right]\right.$$
$$\times\left\{\exp\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)-1\right\}$$
$$\left.+2\exp\left\{2\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right\}\right\}\right]\quad\cdots\cdots\cdots(4\cdot28)$$

となり，（4・28）式の $t=t_0$ の時の d^2F/dt^2 の値の正負について判定する。まず $t_0=t_1$ は，$dF/dt=0$ から求められ，（4・29）式となる。

$$\frac{dF}{dt}=\exp\left\{2\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)\right\}-1=0$$

$$2\left(\frac{2\beta}{\alpha}\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}t+X\right)=0$$

$$t_1=-\frac{\alpha}{2\beta}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}X=t_0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot29)$$

（4・29）式を（4・28）式に代入すると

$$\left.\frac{d^2F}{dt^2}\right|_{t=t_0}<0$$

となり，F は $t=t_0$ で極大値をとる。一方，（4・29）式からわかるように，t_0 は負の値をとるが現象的には適用領域が $t\geqq0$ であるため，$t=0$ で F は最大値をとり F の最大値 F_{max} は（4・26）式に $t=0$ を代入し（4・30）式となる。

$$F_{max}=mG\left(1+\frac{4\gamma\sin\theta}{\alpha g}\times\frac{\exp\left|\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}\right|}{\left|\exp\left|\ln\frac{v_0+\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0-\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}\right|-1\right|^2}\right)$$
$$=mG\left[1+\frac{\gamma\sin\theta}{\alpha g}\left(\frac{\beta}{\gamma}v_0^2-1\right)\right]\quad\cdots\cdots(4\cdot30)$$

次に中間浮子が係留索緊張の状態で，海底支点を中心に動いた係留索に加わる流体抵抗の補正を以下に示す方法で行なった。図4.5に示すように中間浮子端張力を T_{w1}，海底端張力を T_{w0} とおき，力のつり合いを考えると，

$$\left.\begin{aligned}T_{w0}\cos\theta_0+T_{w1}\cos\theta_1&=R\\T_{w0}\sin\theta_0&=T_{w1}\sin\theta_1\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot31)$$

になる。ここで図4.5からわかるように θ_0，θ_1 は（4・32）式に示される。

$$\left.\begin{aligned}\sin\theta_0&=\frac{a}{\sqrt{\delta^2+a^2}}\quad\cos\theta_0=\frac{\delta}{\sqrt{\delta^2+a^2}}\\\sin\theta_1&=\frac{b}{\sqrt{\delta^2+b^2}}\quad\cos\theta_1=\frac{\delta}{\sqrt{\delta^2+b^2}}\end{aligned}\right\}\cdots(4\cdot32)$$

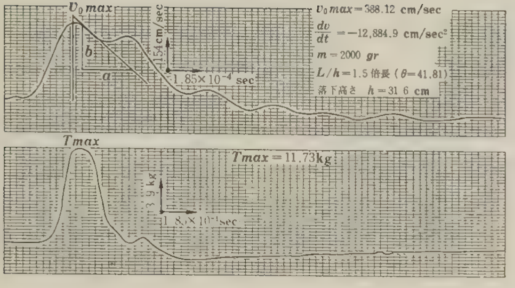


図 4.6 実験記録
Experimental data

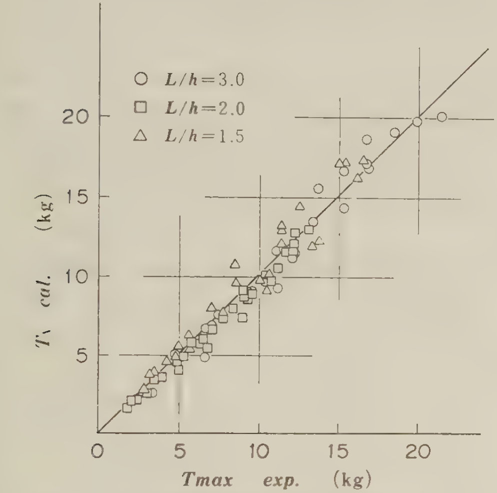


図 4.7 係留索最大張力の理論値 (Tmax)cal と実験値 (Fmax)exp の比較
Comparison of the experimental Values with T caluculationg eq. (4.15)

（4・32）式を（4・31）式に代入すると，

$$\left.\begin{aligned} &T_{w0}\frac{\delta}{\sqrt{\delta^2+a^2}}+T_{w1}\frac{\delta}{\sqrt{\delta^2+b^2}}=R \\ &T_{w0}\frac{a}{\sqrt{\delta^2+a^2}}=T_{w1}\frac{b}{\sqrt{\delta^2+b^2}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4\cdot33)$$

が得られる。いま $\delta \ll a,\ b$ であるから第1次近似は（4・34）…式となる。

$$\left.\begin{aligned} &T_{w0}\frac{\delta}{a}+T_{w1}\frac{\delta}{b}=R \\ &T_{w0}=T_{w1} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot34)$$

一方，鉛直方向のつり合いは，

$$V_0+V_1=R$$

なるゆえに，

$$\frac{V_1}{V_0}=\frac{T_{w1}}{b}\cdot\frac{a}{T_{w0}}=\frac{a}{b}$$

となる。このことは反力 V_1，V_0 は a と b の比で表わせることを示している。したがって，第1次近似的には係留索の中間浮子端の運動と逆方向に働く係留索の流体力 V_1 は（4・35）式で示される。

$$V_1=\frac{1}{L}\int_0^L x\kappa\,DL\left(\frac{x}{L}v^2\right)dx=\frac{1}{4}\kappa Dv^2L^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot35)$$

ここで，κ は係留索の抗力係数で R_e 数が80～420の範囲のため，円柱の抗力係数 $C_D=10/\sqrt{R_e}$ として与え，質量係数は索の径が非常に小さいため無視して，

$$\kappa=\frac{w_0}{2g}\sqrt[3]{\frac{10}{vD_0}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot36)$$

とする。

（4・35）式，（4・36）式を（4・1）式に代入し，係留索に加わる流体力を補正した中間浮子の運動方程式を求めると（4・37）式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_0}{g}V\frac{dv}{dt} &\doteq F\sin\theta-f\cos\theta \\ &-\frac{w_0}{2g}\left(C_DA-\frac{1}{4}\sqrt[3]{\frac{10}{v_0D}}DL^2\right)v^2 \\ &-C_{MA}V\frac{w_0}{g}\cdot\frac{dv}{dt} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot37) \end{aligned}$$

4.4　実験結果とその考察

a.　係留索張力

中間浮子の移動速度と係留索張力 T の実験記録の代表例を図示したのが図 4.6 である。

図4.6からほぼ移動速度 v_{0max} の時に係留索に最大張力 T_{max} が生じていることがわかる。また，$v=v_{0max}$ なる時の中間浮子の移動距離 $x\left(=\int_0^{t_0}vdt\right)$ は，すべての実験でほぼ同じで $x=2$～3cm の値をとる。このことは初期移動による変位角 $d\theta$ が約0.5° 程度と非常に小さく，係留索方向と中間浮子の移動方向は直角になると考えてよいことを示している。

次に，中間浮子の運動方程式，（4・1）式が成り立つか否かについて計算値と実測値を比較した。図 4.7 は，（4・1）式を模型実験に即して変形した運動方程式，（4・37）式に各実験記録から得られた中間浮子の移動速度の最大値 v_{0max} および v_{0max} が生じた以後の速度勾配変化から求めた移動時の平均加速度 $\Delta v/\Delta t$ を代入して F_{max} を求め，F_{max} を（4・15）式によって換算した T_A 計算値と係留索張力の実測値 T_{max} を比較して図示したものである。ここで，中間浮子の抗力係数 C_D には 0.5 を，付加質量係数 C_{MA} には，ポテンシャル流から求められた球体の付加質量係数 $C_{MA}=0.5$ $(C_{MA}=C_M-1)$ を用いた。

図4.7からわかるように計算値 (T_A) cal と実測値 (T_{max}) はよく一致し，中間浮子に連結索を通じて施設浮体により生じた衝撃力が作用した場合，（4・37）式すなわち（4・1）式の中間浮子の運動方程式が成り立つこ

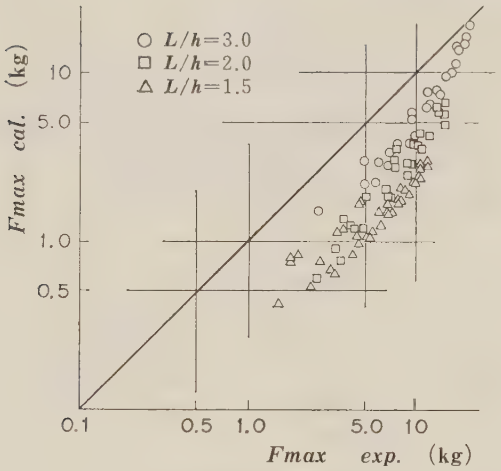


図 4.8　連結索最大張力の理論値（F_{max}）cal. と実験値（F_{max}）exp の比較

Comparison of the experimental values with F caluculating eq.(4.15)

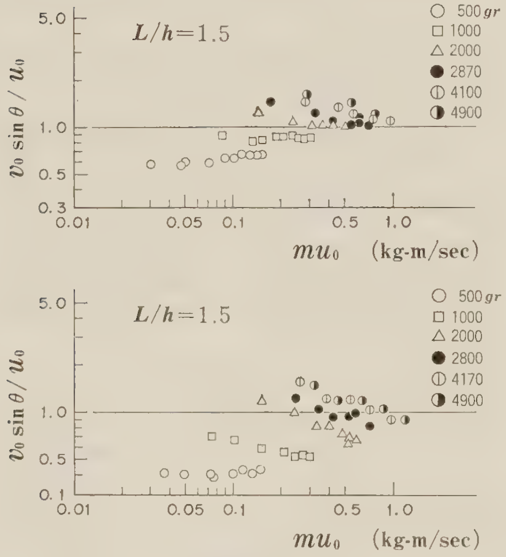


図 4.9　係留索緊張時の重錘の速度 u_0 と中間浮子の速度 v_0 の関係

Relationship between u_0 and u_0 is floting body movement velocity and v_0 is anchor bouy mouement velocity

とがわかる。

b.　連結索張力

連結索を通じて中間浮子に作用する作用力 F_{max} について調べる。

連結索緊張時の重錘の落下速度 u_0（$=\sqrt{2gh}$）から中間浮子の初期移動速度 v_0（$=u_0/\sin\theta$）を求め，（4・30）式に代入して求めた F_{max} 計算値と実測値 T_{max} を（4・15）式を用いて換算した F_{max} 実測値を比較して図示したのが図4.8である。図4.8によると F_{max} が大なる場合実測値と計算値は一致するが F_{max} すなわち mu_0 が小さくなると実験値が計算値より大きくなる傾向を示す。このことは落下速度から直接算出した中間浮子の移動速度 v_0（$=u_0/\sin\theta$）と実験値から得られた v_0 実測値の比較をした図の4.9からもわかるように実験の範囲においては，中間浮子の重量 W と施設浮体を模した重錘重量 m_G との比 W/m_G が約 1/5〜1/50 と大きいことによって重錘の運動量が中間浮子の運動にすぐ転化されず，中間浮子が運動する際の加速度に消費されるためと考えられる。現実のように，$W/m_G \fallingdotseq 1/350$ のように施設浮体の重量に比較して中間浮子の重量が非常に小さい場合には，計算値と実測値は一致すると考えられる。

4.5　中間浮子の衝撃力吸収に具備すべき条件

中間浮子が衝撃力の吸収に有効に作用する条件について考察する。その条件は，

① 中間浮子が衝撃力を吸収している作用時間内に中間浮子が，施設浮体と海底固定点の直線上の点まで移動しないこと。

② 衝撃力の作用時間後，次の衝撃力の作用時間までに中間浮子は，浮力により海面上に浮上していること。

が必須となる。

まず第一の条件について，中間浮子の移動距離を求めると，（4・6）式から

$$S=\int_0^t v\cdot dt=\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\times\int_0^t \tan\left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t+\tan^{-1}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\,v_0\right]dt=\frac{\alpha}{\beta}\ln\left[\cos\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t+\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\,v_0\sin\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha}t\right]\quad\cdots\cdots(4\cdot38)$$

となる。（4・38）式右辺 t に（4・10）式を代入し，衝撃力作用時間内の中間浮子の移動する距離 S_t を求めると

$$S_t=\frac{\alpha}{\beta}\ln\sqrt{1+\frac{\beta}{\gamma}v_0^2}\quad\cdots\cdots(4\cdot39)$$

となる。

一方，図 4.2 から，施設浮体，中間浮子および海底固定点が直線に並ぶ時の中間浮子の移動距離 S_v を求めると

$$S_v=L_1\tan\theta_1=\frac{\frac{L_1}{L}h}{\sqrt{\left(1+\frac{L_1}{L}\right)^2-\left(\frac{h}{L}\right)^2}}\cdots(4\cdot40)$$

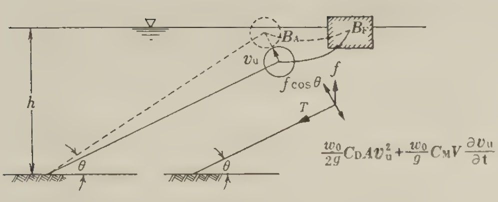

B_A
B_F
v_u
f
$f\cos\theta$
T
h
θ
θ
$\frac{w_0}{2g}C_DAv_u^2+\frac{w_0}{g}C_MV\frac{\partial v_u}{\partial t}$

図 4.10　中間浮子の浮上時の作用力図
Acting force on anchor bouy uplifting

ここに，L, L_1 は係留索および連結索の長さ，h は水深，S_tがS_v より小さくなければならないことから，（4·39）式，（4·40）式を用いて

$$\frac{\alpha}{\beta}\ln\sqrt{1+\frac{\beta}{\gamma}{v_0}^2}<\frac{\frac{L_1}{L}h}{\sqrt{\left(1+\frac{L_1}{L}\right)^2-\left(\frac{h}{L}\right)^2}}\cdots(4\cdot41)$$

が得られ，（4·41）式より L, L_1を定める。

第 2 の条件について求める。

図4.10の記号を用いて，中間浮子が余剰浮力により浮上する際の運動方程式求をめると，（4·42）式となる。

$$\frac{\sigma_0 V}{g}\frac{dv_u}{dt}=f\cdot\cos\theta-\frac{w_0}{2g}C_DA{v_u}^2$$

$$-\frac{w_0}{g}C_{MA}V\frac{dv_u}{dt}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot42)$$

ここに v_u は中間浮子の浮上速度である。

$$V\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)\frac{dv_u}{dt}=\frac{g}{w_0}f\cos\theta-\frac{1}{2}C_DA\ {v_u}^2$$

いま

$$\left.\begin{aligned}\alpha_0&=V\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)\\ \beta&=\frac{1}{2}C_DA\\ \gamma&=\frac{g}{w_0}f\cdot\cos\theta\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots 4\cdot43)$$

とおいて，（4·42）式を解くと

$$\frac{1}{\sqrt{\beta\gamma}}\text{arc tanh}\frac{\beta}{\sqrt{\beta\gamma}}v_u=-\frac{1}{\alpha_0}t+K_1$$

$t=0$ で $v_u=0$ であるから $K_1=0$ となる。

よって，

$$v_u=\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\tanh\sqrt{\frac{\beta\gamma}{\alpha_0}}t\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot44)$$

となる。中間浮子の浮力のみによる t_2 秒後の浮上距離S_uを $t=0$ で，$S_u=0$ の初期条件を代入して求めると，

$$S_u=\int_0^{t_2}v_u\cdot dt=\sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}\int_0^{t_2}\tanh\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha_0}t\cdot dt$$

$$=\frac{\alpha_0}{\beta}\ln\ \cosh\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha_0}t_2\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot45)$$

となる。これが（4·39）式で求めた衝撃力の吸収に要する中間浮子の移動距離から浮上するとすれば，浮上に要する時間は，（4·39）式と（4·45）式を等しいとおいて，

$$\frac{\alpha}{\beta}\ln\sqrt{1+\frac{\beta}{\gamma}{v_0}^2}=\frac{\alpha_0}{\beta}\ln\ \cosh\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha_0}t_2$$

となり，この式より t_2 を求めると，

$$t_2=\frac{\alpha_0}{\sqrt{\beta\gamma}}\text{arccosh}\left[1+\frac{\beta}{\gamma}{v_0}^2\right]^{\alpha/2\alpha_0}\cdots(4\cdot46)$$

となる。この時間 t_2 よりも長い時間間隔でFが作用しなければならない。施設浮体の前後動周期を Tとすれば，

$$t_2<\frac{T}{2}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4\cdot47)$$

を満足するように中間浮子規模を決定する必要がある。

続いて，衝撃力 F_{max} を最小にするための中間浮子の持つべき性質について上記の理論から検討する。

余剰浮力については，（4·13）式を余剰浮力について微分すると，

$$\frac{\partial F_{max}}{\partial f}=\frac{m\sin\theta}{\alpha}\cdot\frac{g\cos\theta}{w_0}>0\quad\cdots\cdots(4\cdot48)$$

でF_{max}はfの増加関数となり，$f=0$で F_{max} は最小となる。このことは，余剰浮力が可及的に小さい方がよいことを意味し，従来石田ら[46)]が指摘している事柄を理論上からも検証出来る。

中間浮子の大きさについては，（4·13）式を中間浮子の容積 Vで微分すると，

$$\frac{\partial F_{max}}{\partial V}=-\gamma m\sin\theta\left[1+\frac{\beta}{\gamma}{v_0}^2\right]\frac{1}{\alpha^2}\cdot\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)$$

$$=\frac{\gamma m\sin\theta\left[1+\frac{\beta}{\gamma}{v_0}^2\right]\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)}{\left\{V\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_{MA}\right)+\frac{mg\sin^2\theta}{w_0}\right\}^2}<0$$

で F_{max} はVの減少関数となる。このことは，中間浮子の大きさが大きいほどよいことを意味する。しかし，これらの事柄は，（4·47）式に示される条件を満足しなければならないため，ある限界を持つことは当然である。

5.　結　　論

本研究で対象とした増養殖施設は，従来，島影，湾内など天然の地形を利用し，波，流れなど施設に加わる外力の小さな場所に増養殖場が形成されていたこと，また施設自体の単体規模が小さかったこと，施設を構成する材料に木材，竹材，岩石などの天然材および古船，古自動車，古タイヤなどの廃棄物などの廃物が利用されてきたのがほとんどであった。そのため，施設の設計は，工学的技術の基礎の上に成り立っているものではなく，漁民の経験的知恵により改良，改善がなされてきた。しかしながら，栽培漁業の社会的，国際的必要性の中から国

の事業として施設の大規模化が進み従来の経験的な思考では対応が困難となりつつあり，施設設計の基準化が急務となっている。

本研究は，現在最も重要となっている増養殖技法である人工魚礁および浮施設を対象とし，従来海岸工学，造船工学など他の分野の研究された結果を応用出来ない水産施設独自の問題について理論解析とその理論の検証を模型実験によって行なったもので結果を要約すると次のようになる。

2.の人工魚礁の工学的研究については，次の事柄が明らかとなった。

① 人工魚礁の構造設計上必要な設計外力のとり方について。着底時の動的な衝撃力を静的な力（着底時部材に生じる慣性力を重力加速度が増加したと考えた衝撃単位体積重量 $\overline{\sigma_G}$）に置換して静的な応力計算法に適用するための衝撃力の計算方法を導いた。

② 人工魚礁の安定計算上必要な海底構築物に働らく波力の算出法には，現在一般に，Morison & O′Brien の式が用いられているが，本論文では，式の適用に際し

(a) 波に潮流を加えた場の流体力について実用式を導いた。

(b) 部材に働らく流体力の算出の場合の慣性力と抗力の支配領域を明らかにした。すなわちK.C数(Keulegan-Carpenter number) が $\pi^2C_M/(2C_D)$ 以下の時は，波力の最大値は実用上慣性力のみを考えればよいことを明らかにした。

(c) 人工魚礁のように部材が複雑に組み合わさっている場合，部材間の相互干渉により流れ場に循環 Γ が生じ揚力が発生する。この場合の部材の波力の算定として，$K.C$ 数 $<\pi^2C_M/(2C_D)$，部材間隙 $2e$ と部材経 D の比 $e/D \geq 1$ の時は，部材の相互干渉を考慮せずによい。

$K.C$ 数 $<\pi^2C_M/(2C_D)$，$e/D<1$ の場合，部材干渉が現われ質量力係数 C_M は e/D の関数となり，（2・52）式で与えられ，特に $e/D<0.5$ のとき質量係数 C_M および揚力係数 C_L は急激に増加することが実験により確認された。

3.の垂下式養殖施設については，海面上の筏，浮子などに保持された垂下物体に作用する波力によって，垂下連の索に生じる索張力を理論的に解明し，模型実験を行なって理論の検証を行なった。その結果，海面上の保持施設（筏または浮子）の構造計算に必要な荷重条件が明らかとなった。すなわち，荷重条件となる垂下連の鉛直最大索張力は，式（3・14）を用いて求められる。

4.の浮施設の係留系については，船舶，海洋構造物ではあまり使用されてなく，水産施設独自に多く用いられている中間浮子を用いた係留系について，中間浮子の運動に伴なう流体抵抗により係留索に生じる衝撃力緩和の機構を明らかとし，衝撃緩和に用いられる中間浮子の大きさ決定のための計算法を確立した。以上各章での研究結果の応用として

2.では，本論中に述べてある如く，人工魚礁の構造計算に必要な設計外力を決定する計算法を明らかとした。このことは，従来全国各県で設計者の判断にゆだねられ，ばらばらに設計されていた魚礁設計が，統一された基準のもとでの設計法の確立に大きく貢献した。

3.の研究結果を応用して，筏式施設，ブイ式施設等垂下連を荷重とする施設の設計基準化を試みた。このことは現在有用養殖種として多く養殖されているカキ，真珠，ホタテなどの水質管理面での漁場の過密化防止のための漁場の沖出に必要な施設設計が可能となり，漁場の拡大化に大きく寄与した。

4.の結果の応用として，従来経験的に水産施設に多く用いられていた中間浮子の大きさ，重量などの設計に理論的根拠を与えた。

以上，本論文の結果は水産施設のほとんどが経験的，試行錯誤的に設計され用いられてきたことを考えると，今後の多種多様な水産施設の設計法確立に一つの道しるべを示したものといえる。最後に本研究の成果は水産施設の水産増養殖施設の設計指針の基礎データーの一部となったことを申し添える。

参考文献

1) 黒木敏郎，佐藤修，尾崎晃：魚礁構造の物理的研究，北海道水産部，昭和39年4月

2) 椹木亨，後野正雄：人工魚礁の背後流況変化の数値シミュレションについて，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp.673～676

3) 吉良八郎，秦英樹：人工魚礁の水理構造に関する実験的考察(2)，水産土木Vol.2 No.1，1965，pp.25～29

4) 佐藤修：人工魚礁研究に関する若干の問題点（批判討論），水産増殖臨時号7，1967

5) 吉良八郎：人工魚礁の水理構造に関する実験的考察，水産土木 Vol.1，No.2，1965，pp.13～18

6) 飯倉敏弘，太田丈夫，吉牟田長生：魚礁ブロックの形状に関する実験的研究，農業土木験試場報告 No.6，1968，pp.73～89

7) 酒井信一：人工魚礁の水理学的および構造力学的特性について，水産土木Vol.1，No.2，1965，pp.31～37

8) 酒井信一：人工魚礁ブロックに対する力学的考察(1)，水産土木 Vol.2，No.1，pp.1965，pp.31～37

9) 尾崎晃：魚礁構造の物理的研究，北海道水産部水産課，昭和39年４月

10) 土木学会編：水理公式集（昭和46年度改訂版）pp.513〜528

11) Irribarren R. : Bulletin of Beach Erosion Board, Vol.3, 1949

12) Hudson, R.Y. : Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwater. WW3, ASCE,1959, pp.93〜121

13) Morison. J. R. et al : The Force Exerted on Piles, Petroleum Transactions American Institute of Mining. Metalluragical and Petroleum Engineers. Vol. 189, TP. 2846, 1950, pp.149〜154

14) MacCamy, R.C. and Funch, R.A. : Wave Force on Piles. A Diffraction Theory, Technical Memo, Vol.69, Beach Earison Board. UrS. Army Corps of Engineers, 1954

15) 土屋義人，山口正隆：柱体に作用する全波力について，第20回海岸工学講演会論文集，1973，pp.25〜30

16) Johnson, E. R. : Horizontal Forces Due to Waves Acting on Large Vettical Cylinders in Deep Water, Transactions of the ASME, 1972

17) 鹿島遼一，丸山康樹，長谷川寛：杭に作用する水平波力変動の解析，第24回海岸工学講演会論文集 1977，pp.342〜346

18) M. Fadihil Al-Kazily : Wave Forces on Pipelines, Coastal Engineering, chapter 109, 1974

19) 林建二郎，重村利幸，竹内俊雄：波力算定式中の抗力係数，質量力係数の時間的変化について，第24回海岸工学講演会論文集，1977，pp.337〜341

20) 椹木亨，中村孝幸： 円柱に作用する規則波による揚力について，第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp.525〜530

21) Sarpkaya : Vortex shedding and Resistance in Harmonic Flow, Naval Post. School, Montery California, 1976

22) 岩垣雄一，石田啓：小口径円柱のまわりの波圧分布と後流渦について，第22回海岸工学講演会論文集 1975，pp.531〜538

23) 岩垣雄一，石田啓ほか：円柱に作用する規則波と振動流による波力の比較，土木学会第32回年次学術講演会，1977

24) Garrison, Seetharama : Interaction of the Waves with Submerged Objects, Jour. of the Waterways, Harbors and Colastal Engineering Div. ASCE. 1971

25) Garrison, Philip:Wave Forces on Submerged Bodies, Jour. of the Waterways, Harbor and Coastal Engineering DiV. ASCE, 1972

26) Chakrabarti : Wave Forces on Submerged Objects of Symmetry, Jour of the Waterway Harbor and Coastal Engineering DiV., 1973

27) 堀川清司，杉山俊幸，松村好造：海底近傍に設置された水平円柱に作用する波力，土木学会第32回年次学術講演会，1977

28) 日本造船学会編：第２回海岸工学シンポジューム 昭和51年６月

29) 上北征男，中村充：人工魚礁の設計外力，第30回応用力学連合会講演会論文抄録集，昭和55年10月，pp.167〜168

30) 中村充，上北征男：人工魚礁の着底衝撃力に関する研究，農業土木験試場報告第16号，昭和52年10月

31) 中村充：沿岸漁場の開発と防災，第10回水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会水理委員会，1974

32) 魚礁総合研究会編：人工魚礁の理論と実際(1)，水産増養殖叢書26，水産資源保護協会，昭和51年３月 pp.71〜118

33) 河野不二夫：海洋構造物（魚礁）の設計に関する基礎的研究，第24回海岸工学講演会論文集，1977，pp.629〜633

34) 上北征男，山崎秀勝：沈設複合構造物に作用する波力に関する一考察，土木学会中部支部講演会，1978

35) 上北征男，山崎秀勝：水平円柱に作用する質量力に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，1980，pp.358〜362

36) Vön Müller, W.: System von Dopplequellen in der Ebenen Strömung, insbesondere die Strömung um zwei Kreisylimder, Zeitschrift für angeuante Mathematik und Mecnkaih, Band 9. Helf 3, June, 1929, pp.200〜213

37) T. Yamamoto and J.H. Nath: Wave Forces on Cylinder Near Plane Boundary, Jour, of the Water ways Narbor and Coastal Engineering, Div., ASCE, 1974

38) T. Yamamoto : Hydrodynamic Forces on

Multiple Circular Cylinder, Jour, of The Hydraulic Div. ASCE, 1976

93) 中村充，上北征男：垂下式養殖施設に働らく流体力に関する研究，農業土木験試場報告第18号，1979 pp.91～98

40) 中村充，上北征男：養殖筏の設計外力に関する研究，第24回海岸工学講演会論文集，1977，pp.625～628

41) 中村充：浮養殖施設の設計法，FAO水産増養殖国際会議論文集⑴，水産庁，1976，pp.126～131

42) 広島県農地経済部水産課編：カキ養殖法，カキ養殖シリーズ1，1966

43) 上北征男，中村充：中間浮子の衝撃力緩和に関する研究，水産工学研究所報告第1号，1980，pp. 33～41

44) 三和英一：係留システム（D.S.P.を含む）の考え方について，第2回海洋工学シンポジューム，日本造船学会，昭和51年6月，pp.57～72

45) 安藤定雄：係留索，鎖，アンカー，シンカー等について，第2回海洋工学シンポジューム，日本造船学会，昭和51年6月，pp.73～93

46) 石田善久：高知県における沖合養殖施設の試験について，水産土木 Vol.12,No.1. 1975,pp. 9～18

Hydraulic Studies on the Aquacultural Facilities

Yukio UEKITA

Summary

This paper deals the hydraulic problems of the aquacultural facilities. The basic equation of the hydraulic force acting to be object in fluid is shown by *Eq.* (1. 1)

$$\sigma V\dot{\boldsymbol{U}}=(\sigma-\rho)V grad\Omega-C_{MA}\rho V(\dot{\boldsymbol{U}}-\dot{\boldsymbol{u}})+\rho V\dot{\boldsymbol{u}}$$
$$-C_DA\frac{\rho}{2}(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u})\mid\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u}\mid+\rho\Gamma(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{u})+\boldsymbol{F}\quad\cdots\cdots(1.1)$$

where, σ is the specific weight of the objects, ρ is the specific weight of the fluid, $\boldsymbol{U}$ is the velocity of the object, $\boldsymbol{u}$ is the velocity of the fliud, V is the volume of the object, A is the projective area crossing at right angles to the fluid, Ω is the gravity potential, C_D is the drag coefficient, C_{MA} is the added mass coefficient $\boldsymbol{\Gamma}$ is the rotation arround the object, $\boldsymbol{F}$ is the acting force.

The hydraulic force of the aquacultural facilities can be analysed by the boundary conditions. In section 2, we dealed the estimation of the impact forces which act on a prefabricated body, such as artificial fish scheme and the forces which influenced mutually on the submerged beem. At the moment that the fallen body collides with the bottom, its equation of motion is givn by :

$$\sigma_G V\dot{v}/g=(\sigma_G-w_0)\ V-C_DAw_0v^2/2g-C_{MA}w_0V\dot{v}/g-R\quad\cdots\cdots(2.6)$$

in whice, v, $\dot{v}$: the motion velocity and acceleration of motion of the body after collision, R: the reaction force from the botton

$$R=K\cdot\varepsilon^2\quad\cdots\cdots(2.7)$$

where, K: the reaction coefficient, and ε:induced displacement in the botton.

Being integrated about ε under boundary conditions as follows,

$$\left.\begin{array}{l} t=0\ ;\ v=v_0,\ \varepsilon=0 \\ t=t\ ;\ v=0,\ \varepsilon=\varepsilon_{max} \end{array}\right\}$$

Eq (2. 6) becomes

$$\frac{gK\varepsilon_{max}^{n+1}}{(n+1)w_0V}-\left[g\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)-\frac{C_DA}{4V}v_0{}^2\right]\varepsilon_{max}-\left[\frac{\sigma_G}{w_0}+C_{MA}\right]\frac{v_0}{2}=0\quad\cdots\cdots(2.11)$$

From *Eq.* (2.10), one can obtain ε_{max} by Newton-Raphson method, for example, so the maximum reaction R_{max} can be obtained. As to facilitate the calculation, the authors assume that the impact force results increase of the unit weight of the body and get the specific weight $\overline{\sigma_G}$ when the body impact the bottom.

$$\overline{\sigma_G}=\frac{K}{V}\cdot\varepsilon_{max}^{n}\quad\cdots\cdots(2.14)$$

With an experiamental apparatus shown as Fig. (2.2), the two $\overline{\sigma_G}$ values, one from *Eqs.* (2.10) and (2.14) with v_0, and another from Fig. 2.7 with R_{max} are compared and show good agreement each other as shown Fig (2.8). The impact force to the artificial fish scheme is get from *Eqs.* (2.11) and (2.14).

The force acting on the body in the fluid is get from *Eq* (1.1) as $\boldsymbol{U}=0$, when the equation of the motion is shown by *Eq*. (2.39)

$$F_f=(C_{MA}+1)\rho V\dot{u}+C_D A\frac{\rho}{2}u^2 \cdots\cdots (2.39)$$

The experiment was development for horizontal circular cylinders near a plane boundary with a wave direction parallel to the boundary and perpendicular to the cylinders.

In this experiment it was marked clear as follows:

① When K.C. number $(=u_m T/D) < \pi^2 C_M/(2C_D)$ and $e/D < 1$, the drag force was neglected in *Eq* (2.39). When the wake is not occur. Where e is the gap length between the cylinder and botton, D is the cylinder's diameter.

② When $e/D > 1$, the added mass coefficient C_M is get by the potential theory.

③ Lift coefficient C_L increases sharply when $e/D < 0.5$.

④ When K.C. mumber $< \pi^2(1+\sum_{j=1}^{\infty} m_j^2)/C_D$, inertia force which two beems influence with other's, is shown by Müller W. equation as follows.

$$C_M=C_{MA}+1=2(1+\sum_{j=1}^{\infty} m_j^2)$$

$$C_L=-4\pi\sum_{j=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{m_j \cdot m_k}{\left(\frac{2s}{a}-q_j\,q_k\right)^2}$$

$$q_n=\frac{1}{(2s/a)-q_{n-1}},\quad q_0=0,\quad m_n=q_1^2, q_2^2, \cdots q_n^2,\quad m_0=1$$

In section 3, the author deals the wave force on the hanging line for the shell culture.

The author formulated the motion of a hanging line as *Eq*. (3.1)

$$\frac{\sigma_G V}{g}\dot{\boldsymbol{v}}=\boldsymbol{f}-\frac{(\sigma_G-w_0)}{g}V\cdot\frac{\partial\Omega}{\partial s}-C_D A\frac{w_0}{g}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_z)\,|\,\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_z\,|$$

$$-\frac{w_0}{g}C_{MA}V(\dot{\boldsymbol{v}}-\dot{\boldsymbol{v}}_z)+\frac{w_0}{g}V \cdots\cdots (3\cdot 1)$$

in which, σ_G and w_0 specifc weight of cultivated species and sea water. V and A: volume of one piece of cultivated species and verieal projective area. g; acceleration of gravity. v_x and v_z velocity and acceleration of water particle in the depth z. $\boldsymbol{v}$ and $\dot{\boldsymbol{v}}$: momentum velocity and acceleration on the hanging line. $\boldsymbol{f}$: tension acing on a hanging line. The vertical component f_v of the force on a hanging line by one piece of the cultivated species at the depth z is given by *Eq*. (3.2) on the assumption that the verical motion is the same as that of water particle at surface $(z=0)$.

$$f_v=\frac{\sigma_G}{g}V\dot{w}_s+C_D A\frac{w_0}{2g}(w_s-w_z)^2+C_{MA}V\frac{w_0}{g}(\dot{w}_s-\dot{w}_z)$$

$$-\frac{w_0}{g}V\dot{w}_Z+(\sigma_G-w_z)V \cdots\cdots (3\cdot 2))$$

The vertical force per unit length of line is expressed by *Eq*. (3.14) which is required to apply the small amplitude wave theory to *Eq*. (3.2)

$$\left.\begin{aligned} M_l \geqq 2D_l &: F_v = \frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\alpha\right\}+W' \\ M_l < 2D_l &: F_v = \frac{M_v}{2D_l}\cdot\frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left\{\frac{l}{d}\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\alpha\right\} \\ &\quad +\left(1-\frac{M_l^2}{4D_l^2}\right)\frac{\pi^2 C_D\beta A w_0 H^2}{2gT^2}+W' \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot 14)$$

where, H and T: wave height and wave period, S_l : the value given by equation as follows, α and β: the value given by *Eq*. (3.11) and (3.13) and d: the length of the hanging line and the interval of installation of cultivated species, and C_M: inertia coefficient ($C_M = C_{MA}+1$)

$$M_l = \frac{2\pi^2 w_0 VH}{gT^2}\left[\left(\frac{\sigma_G}{w_0}-1\right)+C_M\cdot S_l\right]$$

$$D_l = \frac{\pi^2 w_0 C_D A H^2}{gT^2}\cdot S_l^2$$

$$S = 1-\frac{\sinh k(h-l)}{\sinh kh}$$

in which, k: wave number ($k=2\pi/L$), and L: wave length.

$$\sum_1^n S_z = \frac{l}{d}\int_l^n S_z \sum d = \frac{l}{d}\int_{-1}^0 S_z dz$$

$$= \frac{h}{d}\left[\frac{l}{h}-\frac{1}{2\pi h/L}\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}-\frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L}\right\}\right] \equiv \alpha \cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot 11)$$

$$\sum_1^n (S_z)^2 = \frac{l}{d}\int_{-l}^0 S_z{}^2\cdot dz = \frac{h}{d}\left[\frac{l}{h}-\frac{2}{2\pi h/L}\left\{\coth\frac{2\pi h}{L}-\frac{\cosh 2\pi(\mathrm{h}-l)/L}{\sinh 2\pi h/L}\right.\right.$$

$$+\frac{\frac{1}{4\pi h/L}\left\{\sinh\frac{4\pi h}{L}-\sinh\frac{4\pi}{L}(h-l)\right\}-\frac{l}{h}}{\cosh(4\pi h/L)-1} \equiv \beta \cdots\cdots\cdots\cdots (3\cdot 13)$$

The comparion of the calculated values given by *Eq*. (3.14) with the experimental values is shown in Fig. 3.4. Experimental values agree well with the theoretical results.

Accodingly, the vertical tension acting on the upper part of the hanging line is given by *Eq*. (3.14). The designed force on the floating facilities for the shell culture is standardized.

In section 4, the authors deals the mechanism of the absorption by the mooring buoy, set on between the floating body and the mooring cable.

The theory hypothesized the following.

1. The movement length of buoy is so small compared to the cable length L that the degree of movement $d\theta$ is negligible.
2. The elongation of the cable does not effect to the absorption of the impact.
3. The weight of the cable and drag force on the cable are neglected. Then, the equation of the buoy motion is given by *Eq*. (4.1).

$$\frac{\sigma_0}{g}V\frac{dv}{dt} = F\sin\theta - f\cos\theta - C_D A\frac{w_0}{2g}v^2 - C_M V\frac{w_0}{g}\frac{dv}{dt} \cdots\cdots\cdots\cdots (4\cdot 1)$$

where, σ_0, w_0 : unit weight of the buoy and sea water,

V: volume of the buoy, F: acting force on the buoy by the movement of floating body, f: surplus buoyancy of the buoy, A: the projected area of the bouy to v–direction, g: gravitational acceleration, v: moving velocity of the buoy, dv/dt: accerelation of the buoy, θ: degree of tensioned cable to the sea bottom, C_D, C_M: drag coefficient and added mass coefficient of the buoy.

The force F, acting on the buoy by floating buoy is given by *Eq.* (4.2).

$$F=-\frac{dM}{dt}=-\mathrm{m}\cdot\sin\theta\frac{dv}{dt} \quad\cdots\cdots(4\cdot2)$$

where, m:the total of the mass and added mass of floating body.

The maximum acting force F_{max} is given by the subsitution of *Eq.* (4·2) into *Eq.* (4.1).

$$\left.\begin{aligned}
F_{max}&=\frac{\mathrm{m}\gamma\sin\theta}{\alpha}\left[1+\frac{\beta}{\gamma}v_0{}^2\right]\\
\alpha&=\left(\frac{\sigma_0}{w_0}+C_M\right)V+\frac{mg\cdot\sin^2\theta}{w_0}\\
\beta&=\frac{1}{2}C_DA\\
\gamma&=\frac{g}{w_0}f\cdot\cos\theta\\
v_0&=\frac{u_0}{\sin\theta}
\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(4\cdot13)$$

And, the tention T_{max} on the mooring cable is given by *Eq.* (4.15).

$$\left.\begin{aligned}
T_{max}&=\sec\theta\left[F_{max}-F\sin\theta\right]\\
F&=\frac{\beta w_0v_0{}^2}{g}+\frac{\gamma w_0C_MV}{\alpha g}\left(1+\frac{\beta}{\gamma}v_0{}^2\right)
\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(4\cdot15)$$

The experimental values are in satisfactory agreement with the theoretical values.

水工研報告 3
1982 pp.101～126

直立消波工の波圧減殺効果に関する基礎的実験

山本 正昭*

目 次

1. 緒 言 …… 101
2. 従来の研究 …… 102
3. 消波工内の波圧減衰機構 …… 103
4. 実験の方法 …… 104
  4.1 実験施設，模型および測定器 …… 104
  4.2 測定方法および整理方法 …… 104
  4.3 実験ケース …… 106
5. 実験結果と考察 …… 106
  5.1 波圧実験の縮尺効果について …… 106
  5.2 波圧時間曲線 …… 107
  5.3 主な実験ケースの分析と波圧の鉛直分布 …… 108
  5.4 消波工の幅と波長の影響 …… 109
  5.5 消波工の高さの影響 …… 110
  5.6 異形ブロックの影響 …… 111
  5.7 傾斜式消波工との比較 …… 112
  5.8 数値実験結果と水理実験結果の比較 …… 113
  5.9 波圧分布の定式化 …… 115
6. 結 言 …… 116
  6.1 研究成果の要約 …… 116
  6.2 今後の課題 …… 117
  参考文献 …… 117
  付 図 …… 118
  Summary …… 126

1. 緒 言

消波工の利用目的は波圧，反射波及び越波を減ずることにある。近年，漁港の整備が進むに伴って消波ブロックの使用量が増え，消波工の防波堤建設費に占める割合は20%にも及んでいる。また，近年の漁船の大型化による航路水深の増大に伴ない防波堤の設置水深が深くなると共に，波力が増大するためブロック寸法が大きくなり，1個の重量が50トンを越す場合も出現している。したがって水深の増大と幅の増大とにより相乗的に消波工断面が増大し，事業費の伸びにもかかわらず，防波堤の伸長は停滞気味である。

本来，この実験は消波機構の基礎的研究として，消波工幅の影響等について，斜面の影響が入らない波圧減殺効果を求めるために行ったものであるが，直立式の消波工としての効用も考えられる。

直立式消波工が斜面式消波工より有利な点は断面が小さくなること，枠材費などを考慮しても水深によっては建設費が安価になる可能性があること，さらに消波工の底面が拡がらないために港口部等の航路幅を狭めることが少いこと，また，波浪が大きい所では斜面式の場合大きい異形ブロックが必要であるが，枠の中に入れる場合は小さいもので良いため，建設機械等の制約が少なくなることなどが考えられる。

消波工がある場合，背後の直立壁に作用する圧力には ① 消波工内を透過した波又は水塊が作用する力（透過波圧），② 波が消波工に当った際，ブロックを介して壁を押す力，及び ③ 消波工のブロック重量が壁を押す力（ブロック主働圧）が考えられる。この報告では①の透過波圧について調べたものであり，以後，これを単に波圧と呼ぶことにする。

直立消波工を有効に使うためにはどの程度の幅と高さが必要かが重要な問題点である。現在，漁港防波堤の消波工幅は天端でブロック2個並び以上と規定されているが，実際には2個並びがほとんどである。この幅が直立消波工にも適用できるかの検討が必要である。さらに，防波堤本体の天端高は波高3.5m以上ではさく望平均満潮位（HWL）+1.0Hを基準としており，その前面に消波工を設置する場合，その天端高はHWL+0.9Hとしている。直立消波工の場合，この天端高で妥当であるか検討する必要がある。この報告では消波工の幅の問題を主体にし，その高さやブロックの寸法による消波効果についても多少言及した。さらに傾斜式消波工との比較も行った。

---

* 水産土木工学部

2.　従来の研究

従来から防波堤直立壁にかかる波圧公式として，重複波領域ではサンフルーの簡略式が，砕波圧に関しては広井公式が主に用いられている。越波防止，反射抑止のため直立堤の前面を異形ブロック消波工で被覆するケースが近年増加しており，この消波工は波圧減殺効果があることは認められているが，定量的に測定したものとして，テトラポッドに関する古谷[1]の実験をはじめとして，森平ら[2]及び菅原ら[3]による全波力測定や，近藤[4]による波圧の鉛直分布測定，鴻上ら[5]および久保ら[6]による消波工高と幅に関する波圧測定などが系統的な研究の主なものである。

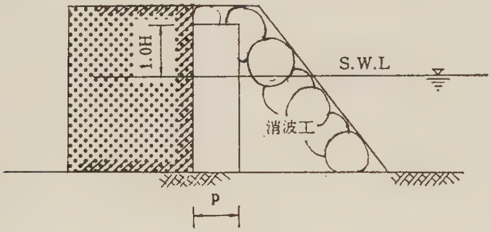


図 1　設計波圧
Design wave pressure now in use

一方，漁港構造物の場合[7]，消波工で被覆された直立壁に作用する設計波圧としては，消波工に十分な幅（天端でブロック２個並び以上）と天端高（0.5H以上）を持たせることを条件として，（１）式で示される波圧強度が静水面上1.0Hの高さ以下に一様に分布するものとしている。

$$p=\frac{1}{2}(1+\cos\ \beta)w_0H \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに，β：波の入射角度

また，運輸省港湾局では53年度に設計波圧を改丁して，直立壁に作用する波力の標準式に合田の式が採用されたが，この公式を消波ブロックで被覆された直立壁に作用する波力に準用する方法[8]，（２）式がある。この前面波圧分布は静水面の高さで最大値p_1，静水面上η^*の高さで０，水底でp_2となる直線分布とし，直立壁底面から天端までの波圧を考慮する。（図２）

$$\left.\begin{aligned}
&\eta^*=1.5\lambda H_0\\
&p_1=\alpha_1\lambda w_0H_0\\
&p_3=\alpha_3p_1\\
&\alpha_1=0.6+\frac{1}{2}\left[\frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right]^2\\
&\alpha_3=1-\frac{d'}{d}\left(1-\frac{1}{\cosh(2\pi d/L)}\right)
\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(2)$$

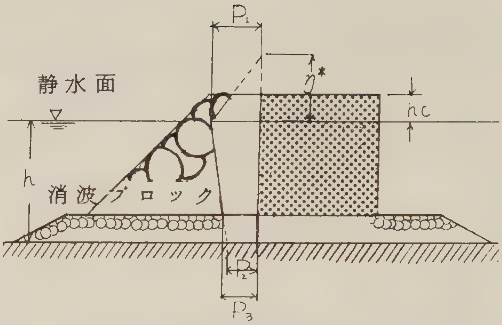


図 2　合田の波圧（消波工有り）
Design wave pressure with absorber by Gohda Formula.

ここに，

d'：直立壁底面の水深（m）

d：堤前面における水深（m）

λ：消波ブロック被覆による波圧のてい減率，

既往の実験結果による検討では，十分に消波ブロックを被覆した場合，λを 0.8～1.0程度とするのが適当のようである。

一方，直立タイプの消波工の波圧減殺効果を調べたものとしては，直立式消波堤の後版にかかる波圧の測定を行った尾崎・鴻上ら[9]の研究，堀口ら[10]の研究，永井ら[11]の研究などがあるが，本報告のように異形ブロックを直立壁の前面に鉛直に設置した場合の波圧減殺効果については菅野ら[12]の研究，小川・時川の研究[13]に見るのみである。

その中で消波工の幅と波長の影響について，菅野らは著者と同様な矩形断面の消波工で実験を行ない，〝消波工の幅員が大きくなれば波圧は小さくなる〞と述べている。この実験では消波工天端高が$+0.6d$～$0.74d$の高さであり，かつ，波圧分布からみても消波工上を幾分越波する条件で実験が行なわれたものと思われる。

また，鴻上ら[5]は消波工天端高が$-0.5d$の場合，消波工幅のちがいによる波圧の比較実験を行っており，最大全波圧（P_{max}）として（３）式を提案している。

$$P_{max}=56.0(B/L)^{1.12}\exp\{-6.60(B/L)\}P_s \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに，P_s：サンフルー簡略式の全波圧。この式によると，波圧の減衰は消波工幅のみでなく，それと波長との比によって指数関数的に減少する傾向があることを表わしている。

近藤ら[4]は傾斜式消波工の異形ブロックの寸法の効果について，「砕波の場合，小寸法の材料を使用する方が波力軽減効果がある」と述べている。

また，久保ら[6]は平均粒径（D）が13.3mmと26.3mm

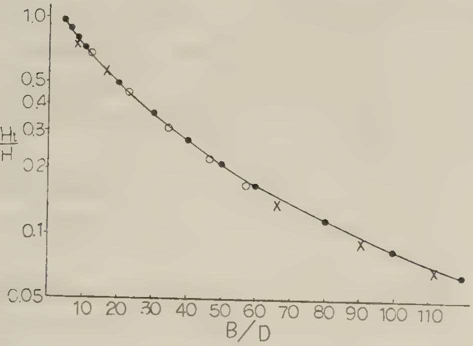


図 3　捨石透過堤による久保らの実験値
Transmission ratio in stonefill dike by Kubo's test.

砂利層（B＝15，30，45，60，75cm）を用いて透過層内における波力の減衰を求めた。その結果，最大全波圧合力は被覆厚（B）の増大に伴なって指数関数的な減少を示し，その減少率（δ）は（4）式で表わされるとした。

$$\delta=\frac{(B/D)^{1.5}}{31.6+(B/D)^{1.5}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

この式で，減少率は B のみでなく，材料の寸法（D）に関係していることを示している。減少率の代りに減衰率（$\gamma=1-\delta$）と B/D との関係を片対数グラフにプロットすると図 3 の通りである。中詰ブロックとして通常考えられる範囲は $B/D<20$ であろう。また，この式では波長の要素が入っていない。

この実験では透過層の終端が不透過壁となっていないことが消波工付防波堤と異なっている。また，砂利の平均粒径が小さいことも注意せねばならない。

3.　消波工内の波圧減衰機構

波が透過性構造物（透過堤）に侵入する場合，その前面で一部反射し，残りが透過層内に伝播され，その伝播中にエネルギーを減じながら透過層の後端に達し，この後面でも一部の波が反射し，残りが背後への透過波となる。しかし，透過性構造物の後面に接して不透過壁が存在する場合は，前述の場合と異なった水粒子の挙動を表わす。

エネルギーの消耗がなく，壁面で完全反射する場合は進行波と反射波の運動が重なり，壁直前では水の水平運動は 0 となり 1/4 波長前方では最大となる。すなわち，

$$u=\frac{gH}{\mathrm{c}}\cdot\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}(y+d)}{\cosh\frac{2\pi}{L}d}\cdot\sin\frac{2\pi}{L}x\cdot\cos\frac{2\pi}{T}t\quad\cdots\cdots\cdots(5)$$

ここに，u は水平方向流速，H は波高，g は重力の加速度，　は波の伝播速度，y は水面よりの位置，d は水深，L は波長，x は反射面よりの距離，T は波の周期，t は時刻を表わす。

それに対し，透過層がある場合は透過層内で波が減衰するが，透過層内でのエネルギー減衰は水粒子速度の 2 乗に比例するから，壁に近い部分ではエネルギーの減衰が小さく，1/4 波長近く離れた所で減衰は大きい。極端な場合として減衰が大きい場合は，1/4 波長以上離れた所では反射波を考慮に入れなくても差しつかえない。

透過層後面に反射壁を有する場合のモデルを考えるとエネルギー変化は

$$\frac{\varDelta E}{\varDelta x}=fu^2=f(u_I+u_R)^2$$
$$=f\cdot a\{H_I\sin 2\pi(x/L-t/T)+H_R\sin 2\pi(x/L+t/T)\}^2\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

ただし，$a=u/H=\mathrm{Func}(L,d)$，f: 抵抗係数

境界条件；

$$\left.\begin{array}{l}x=0\text{ では }H_I=H_R\\ x=-B\text{ では }H_I=H\cdot K\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここに，H は波高，u は水粒子速度，その添字 I と R は入射波及び反射波を表わす。K は反射率とする。

この式は H_I がわかっても H_R が決められないと解けないので数値的に解くこととしたが，この際の水粒子速度は，鉛直速度成分を無視し，u を水平速度のみ考慮した。

数値計算法の基本式は次の通りである。

$$\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial\eta}{\partial x}+f|u|u=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+d\frac{\partial u}{\partial x}=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

ここに，η: 水位，d: 平均水深，g: 重力の加速度とする。

（8）式の各項を $x=k$, $t=j-1$ 点を差分中心点として差分化すると，

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{1}{\varDelta t}\{u(k,j)-u(k,j-2)\}\quad\cdots\cdots\cdots(10)$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial x}=\frac{1}{\varDelta x}\{\eta(k+1,j-1)-\eta(k-1,j-1)\}\cdots(11)$$

$$u=\{u(k,j)+(k,j-2)/2\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

$$|u|=\{u^2(k,j-2)\}^{1/2}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

となり，これらを（8）式に代入すると，

$$\frac{1}{g\varDelta t}\{u(k,j)-u(k,j-2)\}+\frac{1}{\varDelta x}\{\eta(k+1,j-1)-\eta(k-1,j-1)\}+\frac{f}{2}\{u^2(k,j-2)\}^{1/2}\{u(k,j)+u(k,j-2)\}=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

これより $u(k,j)$ を求める陽関数となるように変形すると，

$$u(k,j)=\left[u(k,j-2)\left\{\frac{1}{g\Delta t}-\frac{f}{2}(u^2(k,j-2))^{1/2}\right\}\right.$$

$$\left.-\frac{1}{\Delta x}\left\{\eta(k+1,j-1)-\eta(k-1,j-1)\right\}\right]$$

$$\Big/\left[\frac{1}{g\Delta t}+\frac{f}{2}\left\{u^2(k,j-2)\right\}^{1/2}\right]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

また（９）式の各項についても差分化すると

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}=\frac{1}{\Delta t}\left\{\eta(k,j)-\eta(k,j-2)\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

$$d\frac{\partial u}{\partial x}=\frac{1}{\Delta x}\left\{\frac{1}{2}d(k+2)+d(k))\cdot u(k+1,j-1)\right.$$

$$\left.-\frac{1}{2}(d(k)+d(k-2))\cdot u(k-1,j-1)\right\}\cdots(17)$$

両式を（９）式に代入し，変形すると，水位の式が得られる。

$$\eta(k,j)=\eta(k,j-2)-\frac{\Delta t}{2\Delta x}[\{d(k+2)+d(k)\}\cdot u(k$$

$$+1,j-1)-\{d(k)+d(k-2)\}\cdot u(k-1,j-1)]$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

したがって，(15)，(18)式を使って，境界条件を与えることにより，流速と水位を交互に計算し，波動を求めることができる。詳しくは文献14)に述べている。

4.　実験の方法

4.1　実験施設，模型および測定器

実験に使用した造波水路は長さ55m，幅２m，深さ２mの鉄筋コンクリート造りで，片面の10m区間ガラス張りである。この水路を半幅に仕切って1/50の海底勾配を20m区間設けて，その後方は水路床より40cm嵩上げされた水平床とした。造波機は10HP交流モーター駆動によるフラップ型である。

直立堤体は高さ 10cm のブロックを８段積みとし，その前面に木板を取付けた。その木板の中心に円筒形のストレンゲージ波圧計を高さ10cm間隔で８個取付けた。

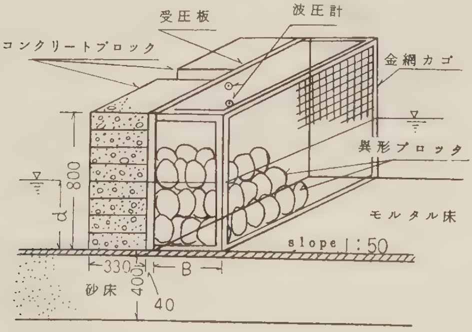


図 4　模型堤体
Model breakwater

直立壁の前面に設ける直立消波工は，水路幅の枠に金網を張って籠とし，その中に異形ブロックを詰め込んだものである。異形ブロックは模型の縮率を考慮して，0.5～４kgを用いた（図４）。

この波圧計のヒズミ量はストレンメータにより増幅され，電磁オッシログラフ（ガルバー固有振動数1000$\mathrm{H_z}$）は記録した。

測定器の問題として，波圧計検出部が温度変化に弱いことがあげられる。すなわち，受圧面の温度変化による伸縮が大きく，それらが圧力変化と同じ結果をもたらすため誤差が大きくなる。特に，波圧計が水面より上方に取付けられている場合，水や波のしぶきによって波圧計受圧面が急に冷やされて縮み，大きいヒズミとなって現われる。この対策として，今回の実験では波圧計を改良し，受圧面にゴム膜を張ってこの現象を防ぐと共に，波圧計円筒部にも常時，水槽の水を掛けて筒内の温度変化を防ぎ，この問題を解決した。

4.2　測定方法および整理方法

模型防波堤の設置水深は主に 40cm とし，波圧計の取付け位置は水面より＋35，＋25，＋15，＋５，－５，－15，－25，－35cmの各点とした。現在，漁港で建設されている主要防波堤の大多数が４m～10mの水深であることからみてこの模型縮尺は1/10～1/25と考えてよい。したがって，設計波の周期が全国的にみて略10秒～15秒であることから，模型波の周期を２秒と３秒とした。（表１）

波圧測定記録から読取りを行なう場合，波形が安定する区間を読取るため，周期２秒では６波目から10波，周期３秒では４波目から10波の各波の同時最高値（＋*peak*）を読取り，この値に較正係数を乗じて波圧強度を求めた。この10波の平均値（p）を求めると共に８個の波圧計の合計より平均全波圧（P）を算出した。

また，10波中で全波圧が最大のもの（$P_{1/10}$）を抽出し，平均値との変動幅を比較した。一方，各ケースとも，

表１　現地換算周期
Prototype wave period (sec)

模型波 縮率	T＝２秒	T＝３秒
1/10	6.3	9.5
1/25	10.0	15.0

表 2　実験ケース一覧

List of model test

実験番号	消波工丈	消波工幅	ブロックの種類	ブロックの重量	水深	波の周期	備考
	cm	cm		kg	cm	sec	
1	0	—		—	40	2,3	本実験
2	20	60	A	4	〃	〃	
3	〃	〃	B	〃	〃	〃	
4	〃	〃	C	〃	〃	〃	
5	16	〃	D	〃	〃	〃	
6	40	60	A	4	〃	〃	
7	〃	〃	B	〃	〃	〃	
8	〃	〃	C	〃	〃	〃	
9	〃	〃	D	〃	〃	〃	
10	〃	〃	D	1	〃	〃	
11	〃	〃	E	〃	〃	〃	
12	〃	〃	C	0.5	〃	〃	
13	〃	40	C	4	〃	〃	
14	60	60	A	4	〃	〃	
15	〃	〃	B	〃	〃	〃	
16	〃	〃	C	〃	〃	〃	
17	〃	〃	D	〃	〃	〃	
18	〃	〃	D	1	〃	〃	
19	〃	〃	E	〃	〃	〃	
20	〃	〃	C	0.5	〃	〃	
21	〃	40	C	4	〃	〃	
22	80	60	A	4	〃	〃	
23	〃	〃	B	〃	〃	〃	
24	〃	〃	C	〃	〃	〃	
25	〃	〃	D	〃	〃	〃	
26	〃	〃	D	1	〃	〃	
27	〃	〃	E	〃	〃	〃	
28	〃	〃	C	0.5	〃	〃	
29	〃	40	C	4	〃	〃	
30	40	斜面式	C	4	〃	〃	
31	60	〃	C	〃	〃	〃	
32	80	〃	C	〃	〃	〃	
33	80	60	C	4	40	2, 3	縮尺効果の実験
34	60	45	C	1.7	30	1.7, 2.6	
35	40	30	C	0.5	20	1.4, 2.1	
36	60	45	C	1.7	30	1.73	消波工幅と周期の実験
37	〃	〃	C	〃	〃	2.60	
38	〃	60	C	〃	〃	0.86	
39	〃	〃	C	〃	〃	1.30	
40	〃	〃	C	〃	〃	1.73	
41	〃	〃	C	〃	〃	2.60	
42	〃	〃	C	〃	〃	3.40	
43	〃	90	C	〃	〃	1.73	
44	〃	〃	C	〃	〃	2.60	

も，同一周期の P の最大値は一般に砕波直後に現れるが，この値を砕波時波圧（P_b）と呼ぶことにした。

4.3　実験ケース

今回行なった波圧実験は基礎実験と本実験に大別できる。基礎実験では模型縮尺効果，波の周期の影響，消波工幅の影響等について調べた。また，本実験では消波工高さ，幅，異形ブロックの種類および大きさを変えて32ケースの実験を行なった（表2参照)。各ケースとも，周期を2種類，波高を5段階に変化させて実験を行なった。なお波高については周期2秒の場合 $H_0=21.4$～42.7cm，周期3秒の場合，$H_0=13.5$～27.8cmの範囲となり，砕波の前後区間を実験する計画であったが，周期3秒の場合，砕波後の状態を作り出すことができなかった。

5.　実験結果と考察

5.1　波圧実験の縮尺効果について

基礎実験として，模型実験の前提となる波圧の相似性に関する実験的検討を以下の方法により行なった。

本実験に用いる模型の4/4，3/4，2/4の大きさの3種類の幾何学的相似模型を作り，波圧計を直立堤に取付けて波圧測定を行なった。すなわち，水深を40cm，30cm，20cmと変え，それに応じて消波工幅，中詰異形ブロックの寸法および波の周期を表2の実験番号33～35に示すように変えて実験を行なった。なお，消波工の高さは水深の2倍とした。

測定値の整理方法は，静水面下の波圧計の時間一波圧曲線の極大値から極小値を差引いた圧力（±p）の10波平均を求め，各測定点の合計から全変動圧（±P）を算出した。各模型の比較を行なう場合は，図5～6に示すように全変動圧を波高と水深で割った値（±P/dH_0）を縦軸，浅水度（H_0/d）を横軸にとってグラフに描いた。

この結果，3種の模型で相似則が完全に成り立つとは言えず，波高が水深の4割以下の場合は小模型ほど波圧の比（±P/dH_0）は大きく現われる傾向を示す。

一方，H_0/d が大きくなり，砕波する場合は模型の大きさによる差異は明確でなく，ほぼ一定値と見ることができる。したがって，小さい模型で行なわれた透過波圧の実験では砕波および砕波に近いとき縮尺効果は余りないが，波高が小さいときは，やや波圧は大きめに測定されると言える。この傾向より実物と模型との波圧の相似性についてまでは及言できないが，消波工の効果で問題となる砕波点付近の最大波圧については相似性に問題ないものと思われる。

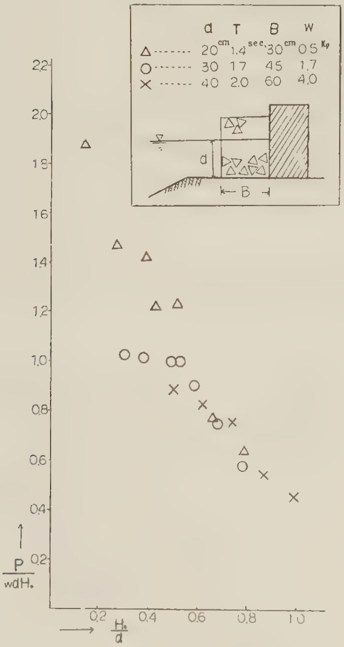


図 5　縮尺比による波圧係数の比較（周期2秒）
Comparison of $P/(wdH_0)$ among different scales（$T=2$ sec）

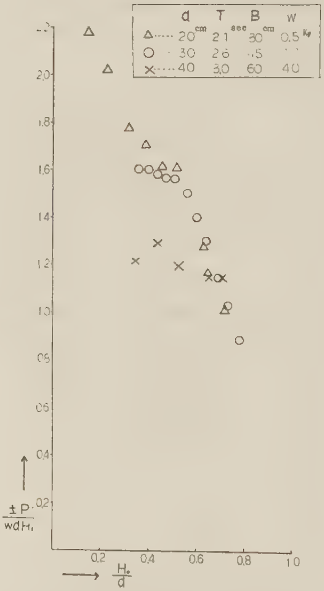


図 6　縮尺比による波圧係数の比較（周期3秒）
Comparison of $P/(wdH_0)$ among different scales（$T=3$ sec）

5.2　波圧時間曲線

図７から図10に電磁オシログラフに記録された波圧曲線の代表例を示す。この記録は左の記録が周期２秒，H_0＝32.1cm，右の記録は周期３秒でH_0＝27.8cmの場合のでいずれも砕波時のものである。

a.　消波工高さ40cm，幅60cmの場合（図７）

消波工高さが水面まである場合の波圧を表わす。この波形は峯が２つに分かれ，前方の峯が針状に鋭くとがっている場合がある。これは衝撃圧が現われていることを示し，この上昇角が垂直に近い程，衝撃圧は大きくなるこのケースでは高さ＋５cmの位置に大きい衝撃圧が表われている。図８は衝撃圧の時間変化を調べたものである。これからわかる通り，衝撃圧の作用時間は極めて短かく1/100秒以下である。したがって，全断面に同時に作用するかどうかを調べた。曲線から判定しうる限りでは，全く同時かどうかの判定は不能であったが，1/100秒以上の差はないと言える。したがって，衝撃波圧の同時全波圧を算出する場合，今回は，各高さの波圧波形時間曲線のピーク値の和を採った。

b.　消波工高さ60cm，幅60cmの場合（図９）

消波工高さが静水面上0.5dある場合，静水面以下の波圧波形は周期２秒の場合峯がやや尖っているが，１波に１峯で衝撃圧は小さい。＋25cm付近では，消波工を越波した水によると考えられる動圧が現われており，その大きさは1.0wH程度である。周期３秒の場合，一般に滑らかな曲線を示しているが時折，峯がとがった衝撃波が現われており，高さ＋15cm，＋25cm，＋35cm部の衝撃圧が大きい。これはやはり，越波によるものである。

c.　消波工高さ80cm，幅60cmの場合（図10）

充分な高さがある場合は衝撃圧が発生することなく，波圧作用高さも＋15cmまでとなっている。波圧波形は，周期２秒，３秒ともやや鋸の目状に近い形となり，砕波の衝撃部は見られない。

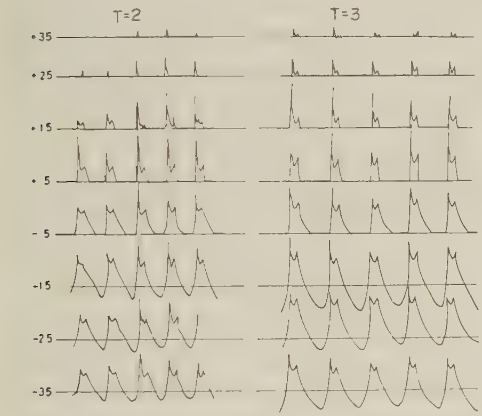


図７　圧力波形
（消波工高さ40cm，幅60cm，ケース７）
Alternation of wave pressure (case 7, h=40cm)

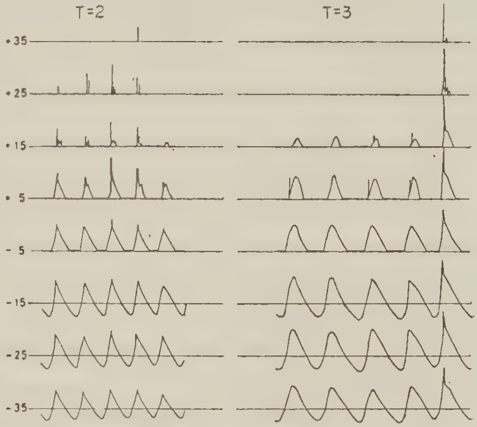


図　９　圧力波形（高さ60cm，幅60cm，ケース16）
Alternation of wave pressure (case 16, h=60cm)

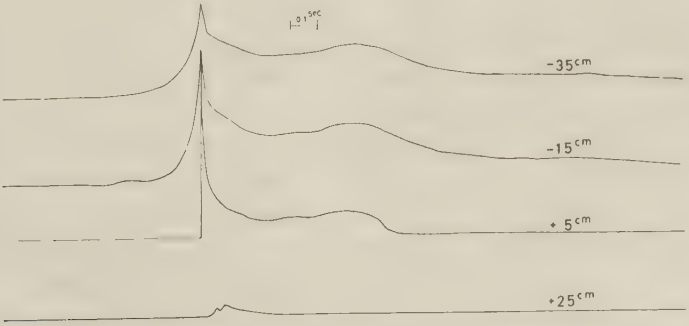


図　８　衝撃圧ピーク時刻の同時性（ケース７，T＝3sec）
Figure of impulsive pressuer (case 7, T=3 sec)

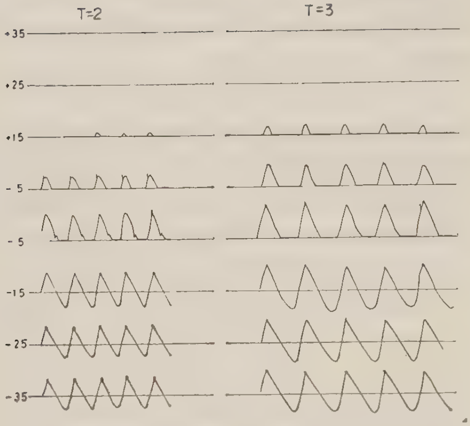


図 10　圧力波形（高さ80cm，幅60cm，ケース24）
Alternation of wave pressure (case 24, $h=80$cm)

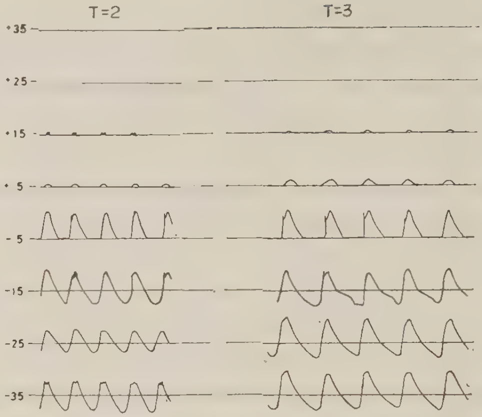


図 11　圧力波形（高さ80cm，幅40cm，ケース29）
Alternation of wave pressure (case 29, $h=80$cm)

d.　消波工高さ80cm，幅40cmの場合（図11）

消波工の高さは充分であるが，幅が c. より小さい場合やはり，衝撃圧はほとんど現われていない。c との波形の相異は前傾の形となっている点である。

5.3　主な実験ケースの分析と波圧の鉛直分布

a. 消波工がない場合（付図1）

周期2秒では $H_0=21.4$cm までは重複波圧分布を呈し，波圧の変動が小さいが，$H_0=26.8$cm の場合，砕波する場合があり，その場合 +10cm 付近に動圧がかかっている。これより沖波波高が大きい場合，波圧強度の最大点は下がって静水面に近づく。

周期3秒では $H_0=20.6$cmまでは重複波の分布形を示しており，各波の誤差は小さいが，$H_0=24.2$cm から砕波を生じる場合が発生し，最大時の波圧は平均値の約2倍となった。$H_0=27.8$cm での最大時断面平均波圧強度は1.05wdすなわち，限界波高をH_bとすると1.35wH_b となった。

b.　消波工の高さ20cm，幅60cmの場合

全体的傾向として，消波工が無い場合より小さい波高で砕波が現われ，砕波による衝突圧も大きい。また静水面付近（－5cm，＋5cm，+15cm）に強い衝撃圧が現われている。最大時のピーク圧強度はミニキン波圧式の最大動圧に匹敵する値である。また，異形ブロックの種類や消波工の積み方等により，波圧分布にバラツキが大きく現われる。最大時の断面平均波圧強度は 2.4wH_bに達する。

c.　消波工の高さ40cm，幅60cmの場合

周期2秒の場合，全圧は消波工が無い場合と同程度であるが，低い消波工を波が越えて壁に当り，その+5cm又は +15cm の点で分布が最大となる。また，10波の平均値と最大値（$P_{1/10}$）との比は150%程度であった。

周期3秒の場合，消波工が砕波をうながすように，波高17cm程度から，静水面上＋5cm 付近に弱い衝撃圧が発生する。$H_0=27.8$cm の時，最大時の断面平均波圧強度は1.95wH_bとなり，消波工がない場合より大きい。

d.　消波工の高さ60cm，幅60cmの場合

周期2秒の場合，衝撃圧はほとんど消波工に吸収されており，波圧分布は静水面＋5cm から水底までほぼ一定で最大時 0.5wd（0.64wH_b）程度となっている。しかし，消波工天端を水塊が越える場合があり，これにより+25cm以上にも弱い動圧が作用することがある。

周期3秒の場合は越波が多く，最大時には2wH_b 程度のピーク衝撃圧が静水面上 15cm 付近に当たることがある。最大時の断面平均波圧強度は 0.76wd(0.97wH_b)となり，消波工断面がやゝ不足している。また，波圧分布は1波ごとのバラツキも大きい。

e.　消波工の高さ80cm，幅60cmの場合

消波工の幅，高さとも充分で，壁体に衝撃圧が作用することもなく，波圧最大値は消波工が無い場合の半分以下に減ずることができる。分布形は静水面下一定とみなすことができる。

f.　消波工の高さ40cm，幅40cmの場合

周期2秒では消波工の幅 60cm の c の場合より波圧は5割程大きく，分布形のピークは静水面上 +15cm に現われる。周期3秒では，分布形のピークが静水面の上下に現われており，消波効果がないことを表わしている。

g.　消波工の高さ60cm，幅40cmの場合

周期2秒の場合も断面が不足となり，越波が大きく，それによる動圧が静水面上+25cm，+35cmに強く働

く。周期3秒の場合も同様である。

h. 消波工の高さ80cm，幅40cmの場合

前節で述べたように衝撃圧は吸収され，消波効果は充分である。波圧の分布形は +15cm 以下一定とみなすことができる。

5.4 消波工の幅と波長の影響

今回の実験では基礎実験の1つとして，消波工の天端を波が越えない条件の基に，波の周期（波長）および消波工の幅が消波効果にいかに影響するかについて下記の方法で実験を行なった。

模型防波堤の設置水深は 30cm とし，充分な高さ（60 cm）をもった，幅45cm，60cm，90cm の3種類の直立消波籠を作り中に 1.7kg のブロックを詰めて消波工とした。このうち幅60cmについて，周期を5種類（0.86秒，1.30秒，1.73秒，2.60秒，3.40秒）変えて，透過波圧に対する波長の影響を探った。また，幅の影響を知るため，消波工幅を45cmと90cm としたものについても2種類の周期で実験を行なった。これらの実験条件については表2の実験番号36〜44に示している。

透過波圧の測定位置は高さ +25，+15，+5，−5，−15，−25cm の6点とした。これらの波圧測定値から前述の方法で平均波圧を求めた。

図12は消波工幅が60cmの場合について，縦軸に P/d，横軸に H_0/d をとって全波圧の波高変化を表わしたものである。この図のパラメータとなっている周期が大きい程透過波圧が大きいことがわかる。この図より波高比 H_0/d が 0.2，0.3，0.4を示す点および砕波時の波圧より $P/(wdH)$ を計算し，この値を図13の縦軸とした。横軸は防波堤設置水深での波長の逆数（$1/L$：対数目盛）とし

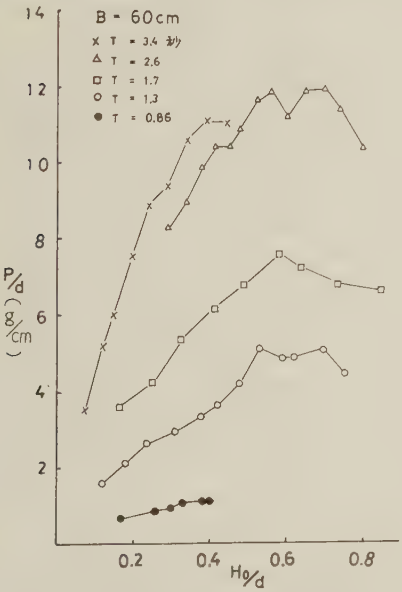


図 12 周期のちがいによる透過波圧の比較

Comparison of wave pressure through the absorber among different periods.

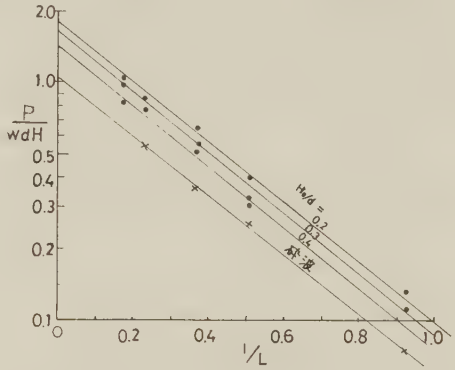


図 13 波長による波圧係数の変化

Relations between $P/(wdH)$ and $1/L$

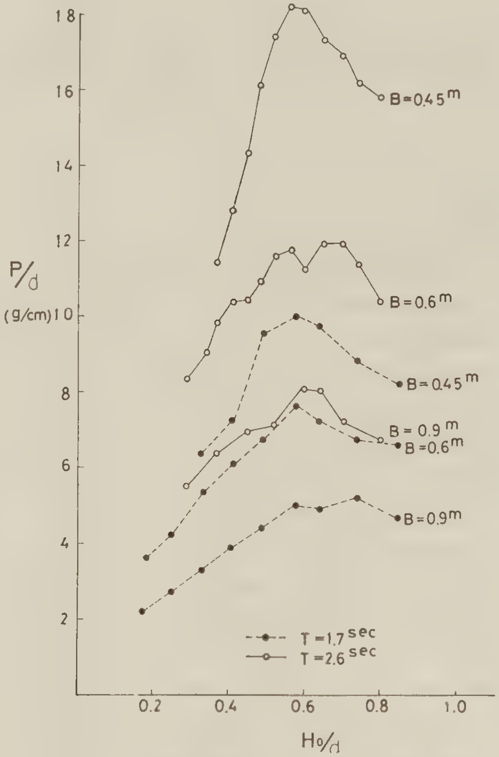


図 14 消波工幅のちがいによる波圧の比較

Comparison of wave pressure through the absorber among different widths of absorbers

た。この図より透過波圧は $\exp(-1/L)$，もしくは L に比例する減衰曲線を示していることがわかる。

図14は周期のみでなく，消波工幅も変化させた場合の実験値であり，縦軸，横軸とも図12と同じである。図15は図14から水深波高比 0.4 および砕波時について P/wdH および P_b/wdH_b を計算し，これを縦軸にとり，横軸には B/L（対数目盛）をとって，これらの関係を求めたものである。この図の減衰曲線より B/L が0.1以上では近似曲線はほぼ 45° の下り勾配を示していることから

$$C_w = \frac{P}{wdH} = C\cdot\frac{L}{B} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

で表わされ，波圧係数 C_w は L に比例するのみでなく，B に反比例することも確められた。

5.5 消波工の高さの影響

消波工の効果を比較するうえで重要な指標の1つとして最大時波圧（P_{max}）があげられる。すなわち，砕波帯内に設置された防波堤は種々の高さの波をうけ，ある波高で波圧が最大となる。この最大時の全波圧を消波工高さごとに比較したものが，図16である。ただし，受圧面の高さは 80cm と一定である。図中，中詰め異形ブロックが4kg以外のものは印の側に重量を書き添えた。

今回の実験では，消波工幅 60cm の場合，消波工高による P_{max} の順序は，周期2秒，3秒共に

20cm＞40cm＞無し＞60cm＞80cm

となった。すなわち，本実験のように海底勾配1/50の場合，直立壁に当たる衝撃圧は余り大きくならないが，水深の半分程度（20cm）の根固工を設置した場合砕波が増長され，強い衝撃波を受けている。また，静水面までの高さの消波工では，消波効果がなく，静水面上に大きい衝撃圧が生じる。消波工丈60cmの場合，周期2秒に対しては充分効果があるが，周期3秒に対しては消波工がない場合の7割程度の波圧を示し，充分とは言えない。消波工丈 80cm の場合は越波も無く，波圧減殺効果も大きい。

消波工幅が 40cm とややせまい場合，全般に波圧は消波工幅 60cm に比べて大きくなる。そのうち，消波工丈 60cm の場合，消波工がない時に比べて20～25％の最大時波圧の減少が見られるが周期2秒に対しても消波効果は不充分である。周期3秒の場合，消波工が被っていない ＋25cm 部分に消波工上の越波による強い衝撃圧が発生している。

衝撃圧は瞬間的で大きい事は言うまでもないが，偶然性が作用するので，値のバラツキが大きくなる。高さが充分な場合，図17に示すように，10波中の最大値と平均値の比は，周期2秒では1.1，周期3秒で1.3程度となっている。また，図18に示すように，高さが 60cm の場合でも，周期2秒のときは P_{max}/P は 1.4程度となっており，大きい衝撃圧は現れていないが，周期3秒の時は，

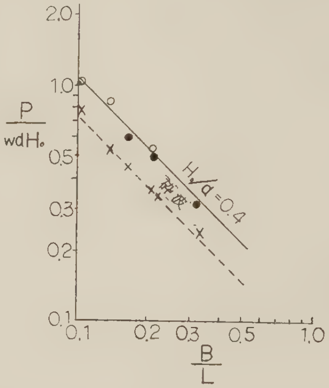


図 15 消波工幅／波長と波圧係数 C_w の変化
Relation between B/L and C_w

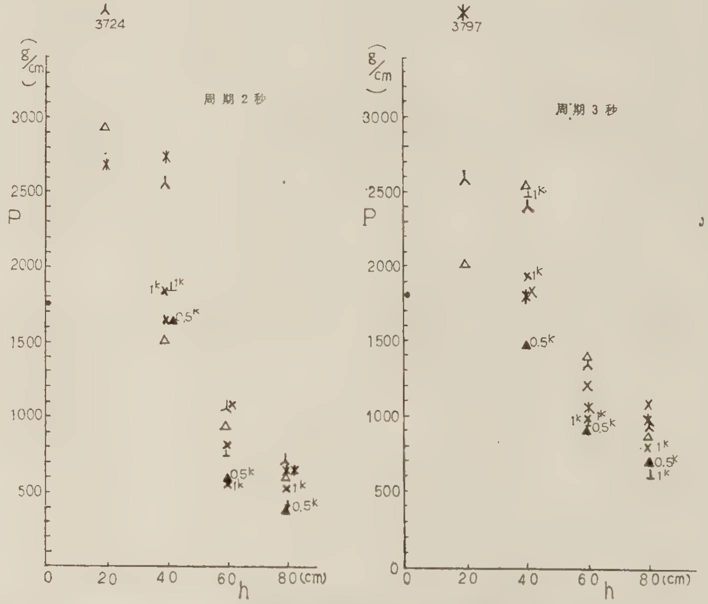


図 16 消波工高さによるピーク波圧の比較（幅60cm）
Relation between P and h

平均値の2倍を越える衝撃圧が現れている。

周期3秒の場合の注目すべき傾向として，高さが80cmの場合に波圧が小さいブロックは，高さ60cmでは逆に波圧が大きくなっている。

一方，波高が小さく通常は砕波を生じない場合について検討すると，図19，20の波高別平均全波圧の図に示すように，消波工がない場合（×印）と比べるとほとんどが大きいか同程度の波圧となっており，この場合，消波効果は期待できない。特に消波工が静水面以下の場合は，小さい波の場合でも消波工が砕波を促進しており，波圧が増大する。したがって，重複波領域では，消波ブロック圧を加味すると，防波堤にかかる全圧は消波工が無い場合よりも大となることは明らかである。

5.6　異形ブロックの影響

a.　異形ブロックの種類による差異

比較を行なった異形ブロックの種類は，A，B，C，Dである。いづれも重量は約4kgであった。単純に最大時全波圧の波圧係数（P/wdH）を挙げると表3のようになり，波と消波工の高さにより，消波効果は変わり，どのブロックが効果があるか一義的に決まらない。また，その差は消波工断面が充分な場合1～2割程度と小さい。

b.　異形ブロックの大きさによる差異

異形ブロックの大きさにより透過波圧に差異が生じるか，又，その値として(16)式は適当かどうか検討する必

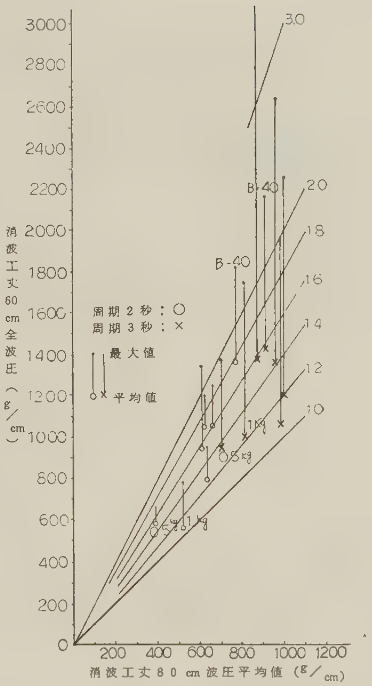


図 18　消波工丈80cmと60cmの全波圧の比較
Comparison of total pressure with absorber height.

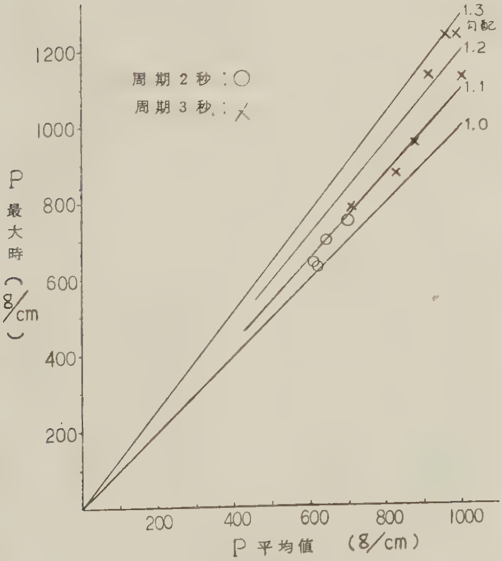


図 17　平均値と最大値の比較
Mean and maximum pressure

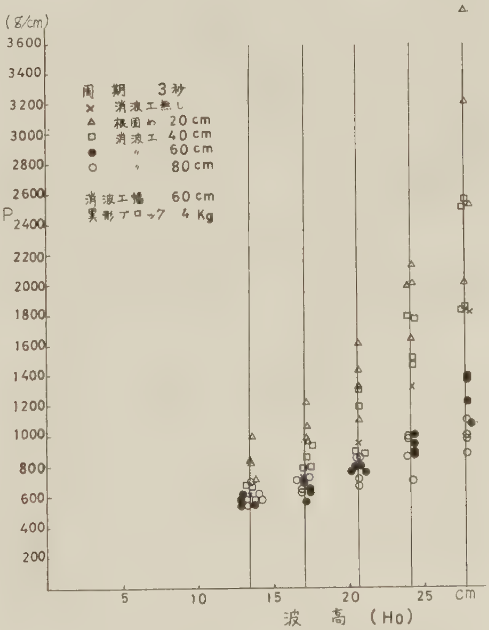


図 19　全波圧の波高 H_0 による変化（周期3秒）
Relation between P and H_0 ($T=3$sec)

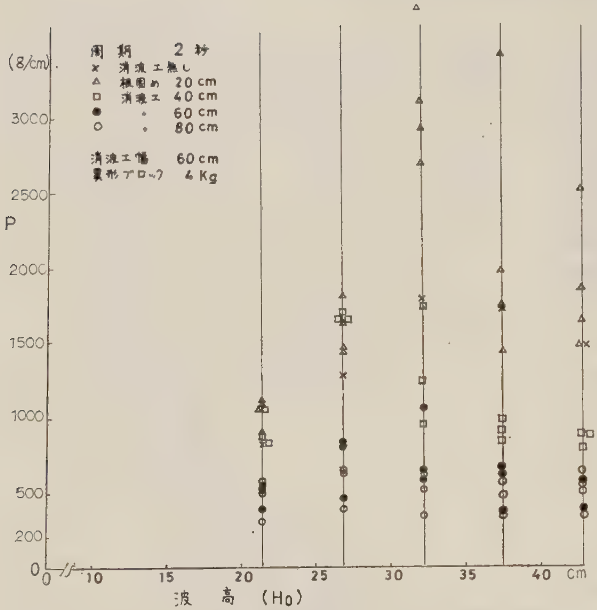


図 20　全波圧の波高H_0による変化（周期2秒）
Relation between P and H_0 ($T=2$ sec)

表 3　$\frac{P}{wdH}$のブロックの種類による比較
Comparison of $P/(wdH)$ with sort of block

高さ 周期 ブロックの種類	60cm		80cm	
	2 秒	3 秒	2 秒	3 秒
A	1.07	1.29	0.60	0.91
B	1.07	1.02	0.56	0.94
C	0.95	1.31	0.53	0.83
D	0.72	0.95	0.58	0.95

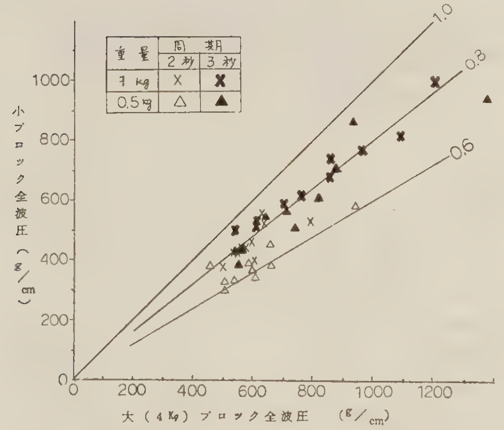


図 21　ブロック寸法による波圧比較
Comparison of P between small scale blocks and large one.

要がある。このため，実験として中詰ブロックの重量の異なるものの全波圧の比較，すなわち，Cブロックの0.5kgと4kg（寸法比1/2.0）とDブロックの1kgと4kg（寸法比1/1.59）との2種類の比較を行なった。その結果を，図21に示すように，小さいブロックを用いた場合，透過波圧は小さくなるが，その程度は波の周期や消波工丈によっても異なる。その最大波圧の比を平均すると，図21に示すように，$h=80$cmの場合，1kg：4kgでは80%，0.5kg：4kgでは71%となった。

したがって，波圧は$\sqrt{D/d}$に比例すると仮定する。ただしブロックの寸法Dは，これを球と考えた場合の直径で与えた。すなわち，4kgブロックは$D=14.9$cm，0.5kgは$D=7.4$cm，1kgは9.4cm，4kgは11.9cmとなる。

5.7　傾斜式消波工との比較

海底勾配，波とも直立式消波工と同じ条件で，現在広く使われている法面を有する消波工について実験を行った。この消波工断面は天端幅40cm，法勾配3/2，消波工丈は40cm，60cm，80cmの3種とした。異形ブロックはCブロックを用いた。ただし，使用ブロックの容量から，平均消波工幅は，各々70cm，85cm，100cmである。傾斜式消波工と直立式消波工を波圧について比較すると以下の通りである。

消波工丈40cmの場合，両方共波圧は大きく，静水面上に動圧を生じており，消波工の効用はない。

消波工丈60cmの場合，傾斜式の波圧強度は$0.65wdH$となり，傾斜式の方が幅60cmの直立式消波工に比べ，波圧が30%強小さくなっており，周期3秒の場合でも平均波圧強度は$1.31wdH$に対し$0.92wdH$となり，消波工の効用を果しているといえる。この差は消波ブロックの量と斜面の影響によるものと思われる。しかし，傾斜式消波工でも消波工上を水塊が越波することがあり，消波工天端上の＋25，＋35cmの高さにも動圧が記録され

表 4 傾斜式消波工付防波堤の最盛時の全波圧 (g/cm)

Total peak pressure at breakwater with sloping absorber (g/cm)

周期 / 消波工丈	2 秒	3 秒
40cm	1705	2332
60cm	719	1099
80cm	372	616

表 5 数値実験ケース一覧

List of numerical test

ケース	区 分	RN	H m	T sec
1	消波工	2.0	1.0	7.5
2	〃	〃	1.0	10.0
3	〃	〃	1.0	15.0
4	〃	〃	1.0	20.0
5	〃	〃	2.0	7.5
6	〃	〃	2.0	10.0
7	〃	〃	2.0	15.0
8	〃	〃	2.0	2.00
9	〃	〃	3.0	7.5
10	〃	〃	3.0	10.0
11	〃	〃	3.0	15.0
12	〃	〃	3.0	20.0
13	〃	〃	4.0	7.5
14	消波工	〃	4.0	10.0
15	〃	〃	4.0	15.0
16	〃	〃	4.0	20.0
17	〃	3.0	3.0	7.5
18	〃	〃	3.0	10.0
19	〃	〃	3.0	15.0
20	〃	〃	3.0	20.0
21	透過堤	2.0	1.0	10.0
22	〃	〃	2.0	10.0
23	〃	〃	3.0	7.5
24	〃	〃	3.0	10.0
25	〃	〃	3.0	15.0
26	〃	〃	4.0	10.0

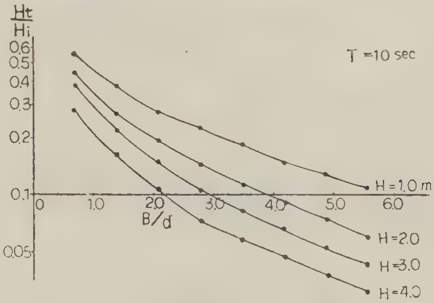


図 22 透過堤の幅と伝達率

Width of the permeable breakwater and transmisson ratio

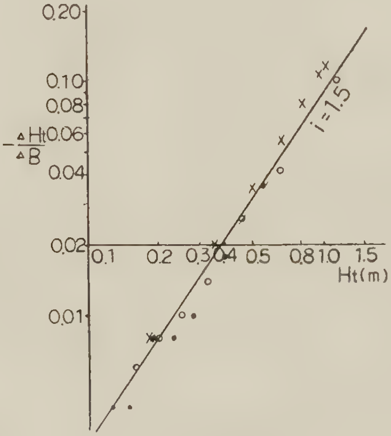


図 23 透過波高の減衰率

Reductive ratio of transmitted waves.

ているが，その大きさは 1 wH を越えるものではない。

消波工丈80cmの場合も，直立式：傾斜式のC_w 比は周期 2 秒の時，0.62：0.38，周期 3 秒の時，0.83：0.58と傾斜式の波圧が小さくなっているが，これも消波工丈60 cmの場合と同様な理由によると思われる。

しかし，$B/d=2.0$ と傾斜式にほぼ等しくした場合の直立壁の C_wは，それぞれ 0.41，0.61 となり，傾斜式とほとんど差がないことになった。

5.8 数値実験結果と水理実験結果の比較

数値実験は表 5 に示す条件のケースについて行った。透過堤の実験は消波工の場合との減衰機構の比較のため合わせて行った。

透過堤の場合，数値実験値（図22，23）から減衰率を次の(20)式のように表現できる。

$$\frac{dH_t}{dB} = -aH_t^{1.5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

ただし，H_t：透過波高 (m)，B：透過層 の厚さ，a：

粗度等により決まる係数で，図23では0.09である。伝達波高は

$$\int H_t^{-1.5} dH_t = -ad\int B$$

$$2H_t^{-0.5} = aB + C$$

ここに，$B=0$のとき $H_t=C_0H_i$，(H_iは入射波高，C_0は係数）と置くと(21)式となる。

$$Ht = \frac{1}{\left(\frac{a}{2}B + \frac{2}{\sqrt{C_0H_i}}\right)^2} \cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

または，波高透過率は(22)式となる。

$$\frac{H_t}{H_i} = \frac{1}{\left(\frac{a}{2}B\sqrt{H_i} + \frac{1}{\sqrt{C_0}}\right)^2} \cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

ただし，C_0・H_iにより変わり，数値実験では次のような値となった。

$H_i=1$m のとき　$C_0=0.91$

$H_i=2$m のとき　$C_0=0.88$

$H_i=3$m のとき　$C_0=0.80$

前述の久保らの波高減衰率を表わす(4)式は，(22)式において $a\sqrt{H_i}=0.0125/D$, $C_0=1.21$ と置くと良く適合する（図3中の実線）ことが判明した。

したがって，透過堤の場合の結果を要約すると，

①透過波高の減衰率（$\Delta H/\Delta x$）はその地点の波高によって決まり，波高が大きい程，減衰が大きい。

②波の減衰に対する周期の影響は小さい。（図24）

一方，消波工の場合，透過堤の場合と異なって，背後に不透過壁があるため，消波工厚と波長との比が入射波高と共に，消波工内流速，すなわちエネルギー減衰を決定する最大の要因となる。すなわち

③壁面波高比率(H_w/H)は波高が同じ場合，消波工厚(B)と波長との比（B/L）で決まり，$B/L<0.05$では減衰率は小さく，$0.1B/L<0.5$ではほぼ消波工厚に反比例して，壁前面波高（H_w）は小さくなる。（図25）

④さらに，その波高比はHによって変わり，$\sqrt{H}$の変化がBの変化に相当する。したがって$0.1<B/L<0.5$の場合，$L/(B\sqrt{H})$にほぼ比例する（図26）

しかし，波高が小さい場合は減衰率曲線は緩勾配となり，波高が大きくfも大きい場合は減衰曲線は急勾配となる。

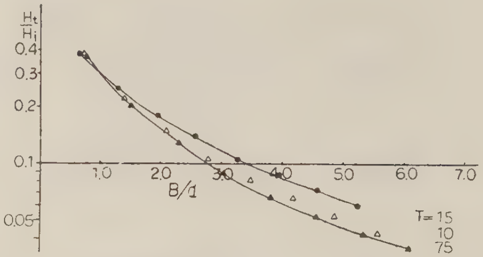


図 24　波高透過率の周期によるちがい($H=3$m)
Comparison of transmission ratio among different periods.

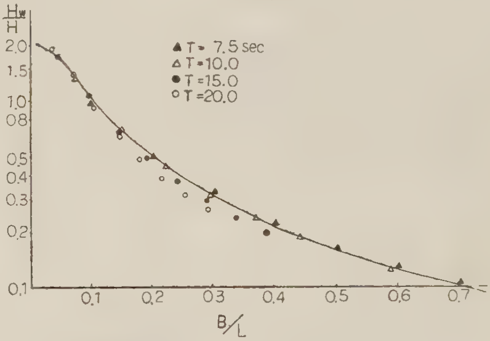


図 25　壁面波高比とB/L（$H=2$m，$RN=2.0$）
Relation between H_w/H and B/L
($H=2$m，$RN=2.0$)

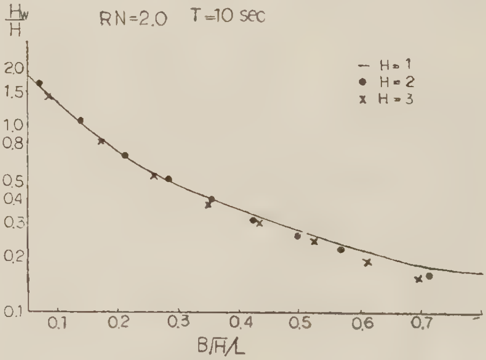


図 26　壁面波高比に対するHの影響
Relation between H_w/H and wave height.

以上のことが水理模型実験についても成り立つかどうか比較検討したものが図27である。この結果$0.1<B/L$で波圧係数$P/(wdH_0)$はB/Lにほぼ反比例すること，また波高が大きい程，消波率が良いことも確かめられた。すなわち，砕波（$H_0/d\fallingdotseq0.7$）と$H_0/d=0.4$との実験式の水平方向距離は約1.45であり，前述の波高の比の平方根に近い値を示している。したがって，波圧係数又は波高伝達率の実験式は(23)式のように仮定できる。

$$\frac{P}{wdH} = \frac{H_w}{2H} = C\frac{L}{B} \cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

ただし，係数Cは水深，波高およびブロックの代表径などによって決まる比例定数であり(24)式で表される。

$$C = K/\sqrt{\frac{H}{d}} \cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

このKは消波ブロックと波高により決まる実験値で，実験では0.066が当てはまった。したがって

$$\frac{P}{wdH}=0.066\sqrt{\frac{d}{H}}\ \frac{L}{B} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

消波ブロックの大きさの項を入れると，ブロックCの場合(26)式となる。

$$\frac{P}{wdH}=1.64\sqrt{\frac{D}{d}}\times 0.066\sqrt{\frac{d}{H}}\ \frac{L}{B}$$

$$=0.108\sqrt{\frac{D}{H}}\ \frac{L}{B} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$

この実験式と実験データをプロットしたものが図28である。

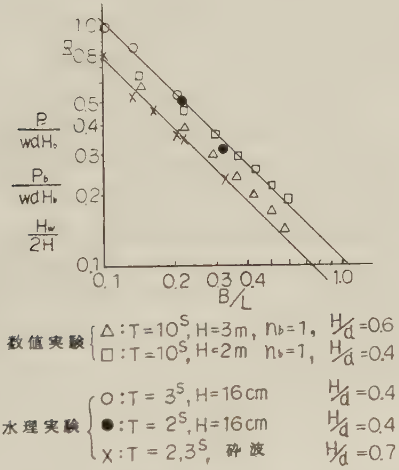


図 27　数値実験と水理実験の比較

Comparison between numerical model test and hydraulic model test.

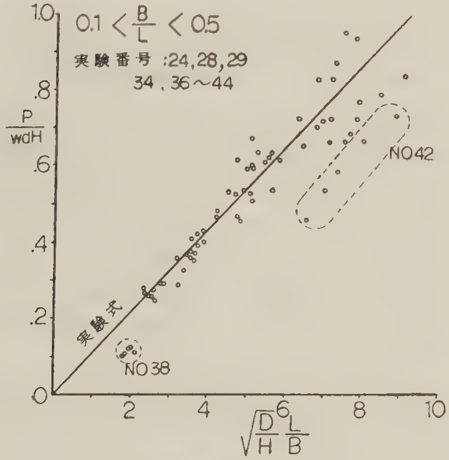


図 28　実験式のあてはまり

Comparison between test value and estimated value.

5.9　波圧分布の定式化

a.　消波工の高さが充分で消波工天端を越波しないでかつ，前面の砕波する場合5.3で述べたように，静水面以下の波圧分布は等分布とみなせる。設計に用いる波圧として，平均値の代りに最大値を用いると，図17よりわかるように，全波圧は(26)式で計算される値より約30%大きい(27)式となる。図29のような波圧分布を仮定すると，この全波圧(P)と波圧強度(p_1)との関係は(28)式となる。

$$P=K'wd\sqrt{DH}\ L/B \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

$$K'=0.14$$

$$p_1d+\frac{1}{2w}p_1^2=P \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

この(27)式をp_1について解くと，(29)式となる。

$$\frac{p_1}{wd}=\sqrt{1+2P/(wd^2)}-1$$

$$=\sqrt{1+2K'\sqrt{DH}\,L/(Bd)}-1 \quad\cdots\cdots\cdots(29)$$

この式を実験結果と比較するため，$D/d=0.37$，$B=0.6$m，$K'=0.14$を代入すると，

$H=20.1$cm，$T=2$秒の時，$p_1=13$(g/cm^2)

$H=22.2$cm，$T=3$秒の時，$p_1=20$(g/cm^2)

となり，図30に示すようによく一致する。

b.　越波を許す場合

現行の漁港構造物設計基準では，消波工天端高は，HWL+（波高の6割から9割）となっており，越波の可能性は大である。この様な場合でも越波による動圧が然程大きくなく，一様分布に近い場合は消波工の波圧減殺効果が認められる。たとえば，消波工丈60cmの場合，

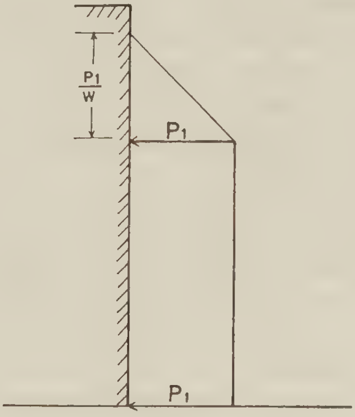


図 29　非越波時の波圧分布の仮定

Assumed distribution chart of wave pressure intensity in case of non-overtopping.

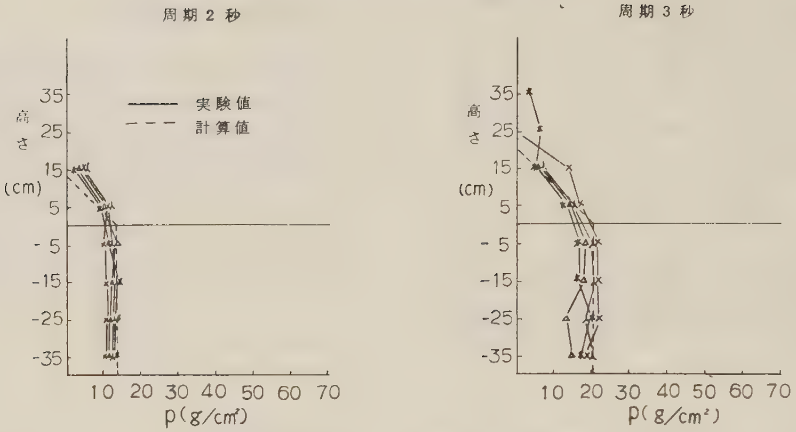


図30　実験最大波圧と設計波圧の適合性

Comparison of pressure distribution chart between test value and estimated value.

消波工幅60cmで周期2秒の場合は良いが，周期3秒の場合や消波工幅40cmの場合は不充分である。周期3秒の場合は周期2秒と同程度の波圧減殺を期待するには幅が0.16L，すなわち92cm程度必要であろう。

消波工丈60cm，幅60cm，周期2秒の全波圧は，平均値では消波工丈80cmの場合の1.5倍程度であるが，最大時はバラツキが大きく，消波工丈80cmの場合の約2倍にあたる1300g/cmとなった。また，周期3秒の場合，最大値は約2500g/cmとなり，消波工丈80cmのときの約2.7倍となっている。このように周期が大きくなるに従って，越波が大きくなり波圧も増大する傾向がみられる。このことは菅原，高木の研究3)でも指摘されている。波圧分布図より，平均波圧強度は等分布波圧と考えて，波圧の作用高をrと仮定し，全波圧P_Dおよび波圧強度p_2を求めると

$$P_D=K'wd\sqrt{DH}\ L/B \cdots\cdots(30)$$

$$K'=0.21(B/L=0.16,\ R/d=0.5)$$

$$K'=0.29(B/L=0.10,\ R/d=0.5)$$

したがって，波圧分布としては，(31)式となる。

$$p_2=\frac{K'\sqrt{DH}\cdot L}{(d+r)\cdot B}\cdots\cdots(31)$$

現行の設計基準に従うならば，波圧係数C_wは約1.8であるが，実験では周期2秒の場合はC_wの最大値は1.3，周期3秒の場合の最大値は2.4を示し，周期3秒では天端高Rが不足であるといえる。現行の基準が適用できる天端高の範囲を検討するにはデータに乏しいが，天端高を$R=0.5d$とした場合の所要幅は0.13L程度であろうことが判る。

c.　傾斜式消波工の場合

(30)式を越波がほとんど無い傾斜式消波工にあてはめると，Kの値はややばらつき，最大圧時で0.13～0.21の値を示した。この場合の消波工幅Bとしては静水面位置での消波工の厚さとした。一方，森平らの実験2)ではKの値は最大圧時，海底勾配1/50で0.25，勾配1/25で0.32勾配1/10で0.54を，また，近藤の実験4)の勾配1/20では0.32程度を示し，いずれも筆者の実験値より大きい値を示している。これらよりK値は海底勾配により変ることが推定できる。

6.　結　　言

6.1　研究成果の要約

①消波工の実験で小縮尺模型で行うと，非砕波領域で縮尺効果が現れることがある。

②消波工は衝撃波圧を消す効果が大きく，越波しない場合，堤幅40cm(0.07L)でも衝撃圧部は消えた。

③消波工高は，波の周期および消波工幅との関係により決める必要がある。その高さにより，全く越波せず静圧分布する場合，越波はするが強い衝撃圧は発生しない場合，消波工が低く，砕波が促進され，消波工がない場合より衝撃圧が増大する場合とに分かれる。

④消波工高が高く越波しない場合は消波工幅の変化による透過波圧はB/Lが0.1以上の場合，消波工幅に反比例し，波長に比例する。

⑤中詰め異形ブロックの種類による差は小さい。またその寸法が小さい程波圧は減少し，寸法比1/2（重量比1/8）で約30%の減少となった。

⑥越波しない場合の波圧分布は，静水面以下は一様分布，静水面上は三角形分布とし，一様部分の波圧強度

は(26)式が適当である。

6.2 今後の課題

消波工の未解決問題としてブロック圧が挙げられる。最近，消波工のブロックがケーソン堤の壁に穴をあけた事故を数例見聞した。例えば異形ブロックの一端がケーソン壁に当たり，これを破壊して中詰砂が洗い出されている例が多い。すなわち，波がブロックを押す力とブロックの主働圧とが重なって，ブロックの一端に加わったためと思われるが，現設計法ではこのブロック圧に対する指針が何も示されていない。

著者らはブロックを介して，壁に働く波力を測定しようと，一,二の試みを行ったが，失敗に終った。今後も，このような事故に対する対策を研究しなければならない。

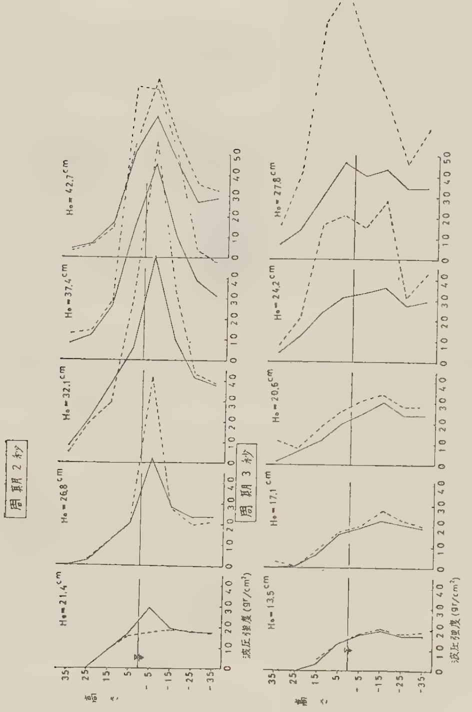
しかし，壁体に対する力を考えた場合，従来から考慮されている透過波圧が最も大きく，前述のブロック波力は，作用時刻にずれがあり，同時最大圧を考える場合は算入しなくても良いであろう。しかし，常時働いているブロック主働圧は，透過波圧が小さくなれば相対的に大きくなるので，設計上，同時圧として算入する必要があると思われる。

また，消波工と壁が一体となった防波堤型式では，砕波圧に対しては，消波工前面での衝撃圧が大きいと思われるので，この波力の測定が必要である。

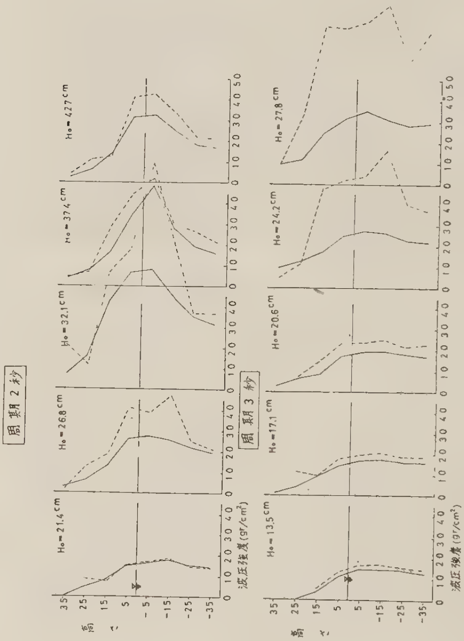
参考文献

1) 古谷浩三，鴻上雄三，近藤俶郎：テトラポット防波堤に関する実験的研究，第８回海岸工学講演会講演集。pp.91〜96，1961
2) 森平倫生，柿崎秀作，菊谷徹：異形ブロックの波力減殺効果に関する研究，港研報告第６巻４号，1967
3) 菅原輝男，高木伸雄，山本正昭：消波工による波圧減殺効果について，第26回海岸工学講演会論文集 pp.362〜366，1979
4) 近藤俶郎：異形ブロック消波工に関する二，三の考察，第18回海岸工学講演会論文集，pp.197〜202 1971
5) 鴻上雄三，時川和夫：施工段階における消波工の波圧減殺効果に関する実験的研究，第17回海岸工学講演会論文集。pp.205〜210，1970
6) 久保弘一，井田保夫：透過層による波力の減衰について，第19回海岸工学講演会論文集。pp.367〜372，1972
7) 社団法人　全国漁港協会：漁港構造物標準設計法 pp.17，1976
8) 社団法人　日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準同解説。pp.2〜116，1979
9) 尾崎晃，鴻上雄三，永田慧，苅谷広見，松崎勝夫：直立式消波堤の開発と水理特性，第24回海岸工学講演会論文集。pp.250〜254，1977
10) 堀口孝男，布施敞一郎，斎藤修司：多孔式防波堤に作用する波力，第24回海岸工学講演会論文集。pp，323〜327，1977
11) 永井荘七郎，角野昇八：スリット型防波堤に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集。 pp.100〜105，1976
12) 菅野一，桜井輝男，塩谷清：透過工法による波圧減少に関する実験研究，第17回海岸工学講演会論文集，pp.199〜203，1970
13) 小川達彦，時川和夫：多孔型ケーソンタイプ消波防波堤の特性，第23回海岸工学講演会論文集。pp.106〜111，1976
14) 山本正昭，長野章：微少振幅波の平面伝達に関する数値解析，農土試技報*D*（水産土木)15号，pp.39〜60，1974

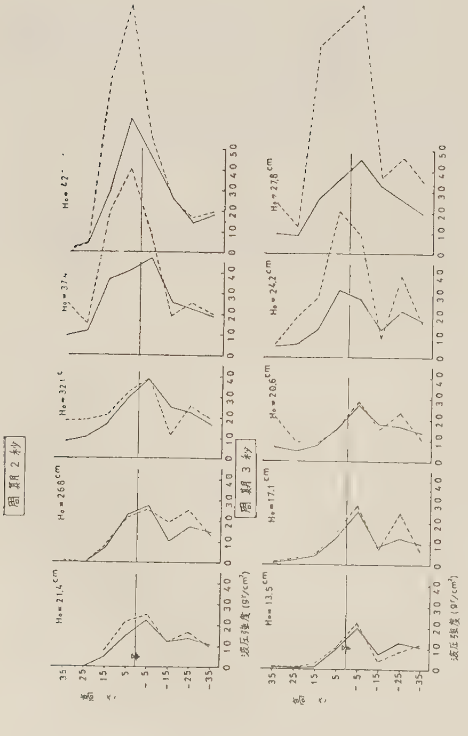
(Case 1～4)　Distribution chart of wave pressure intensity.



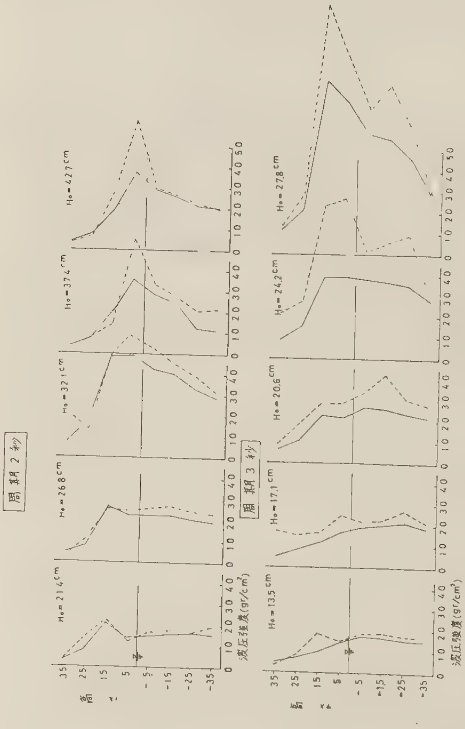
Case 2



Case 4

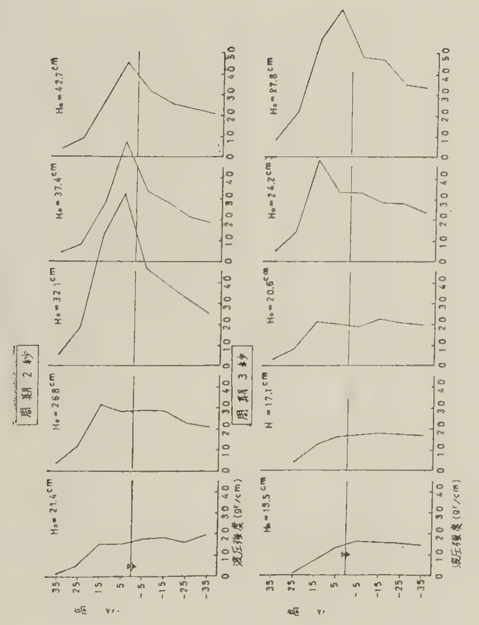


Case 1

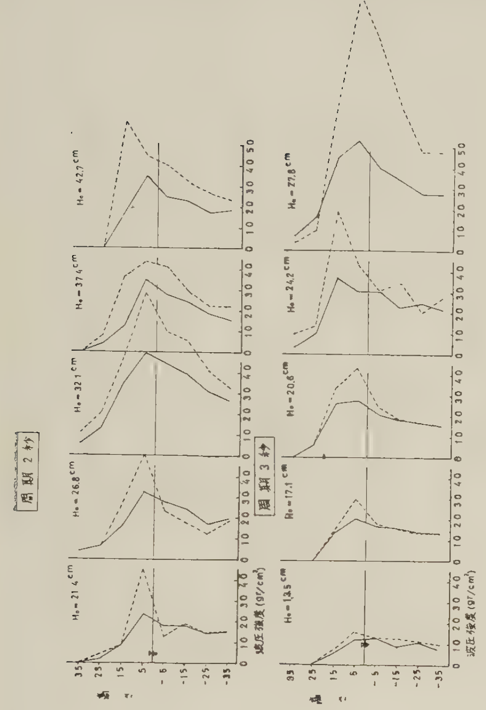


Case 3

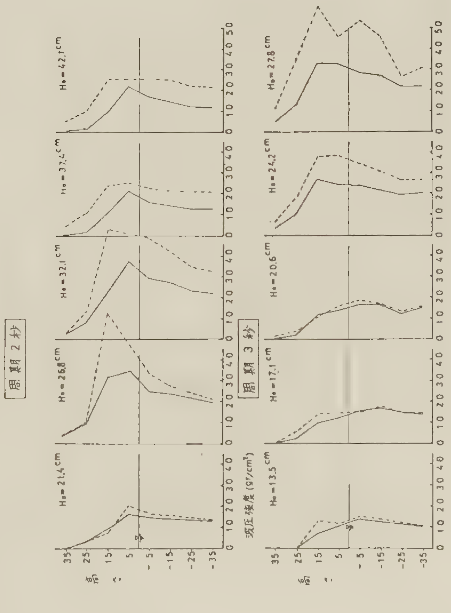
(Case 5～8) Distribution chart of wave pressure intensity



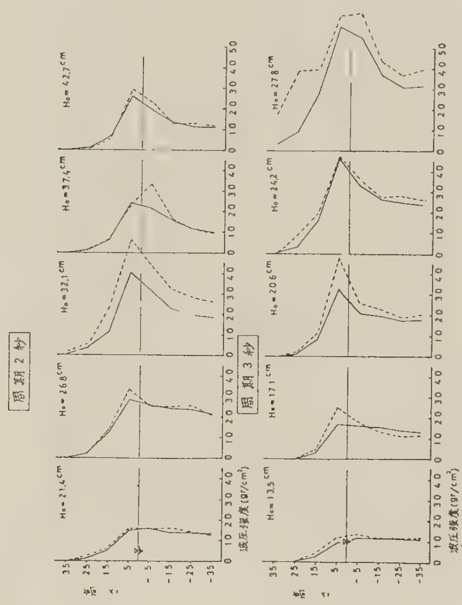
Case 5



Case 6

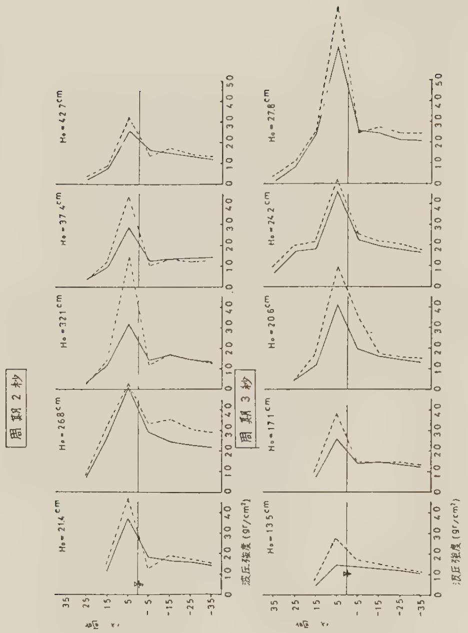


Case 7

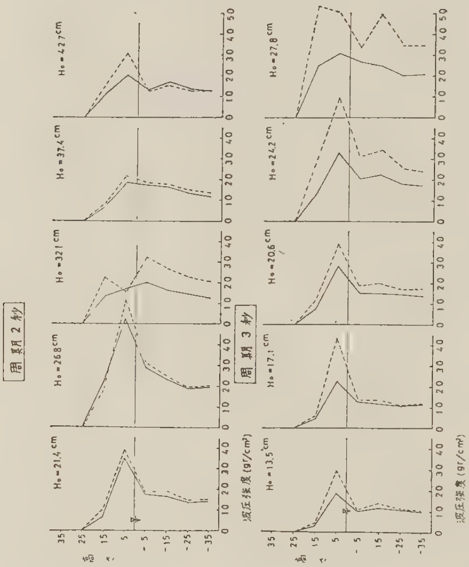


Case 8

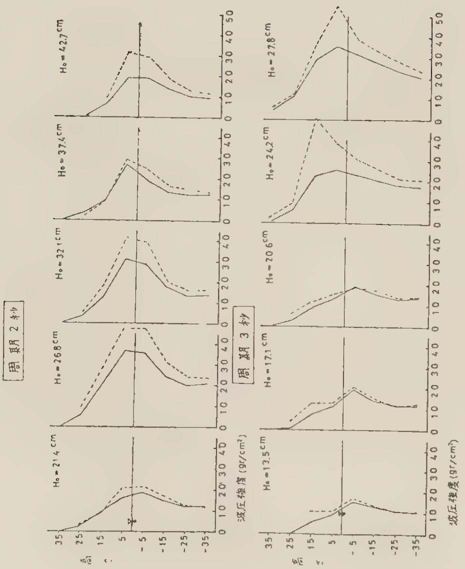
(Case 9～12) Distribution chart of wave pressure intensity.



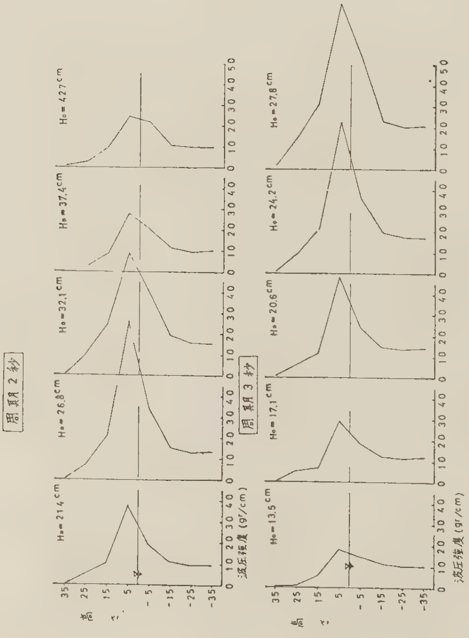
Case 10



Case 12

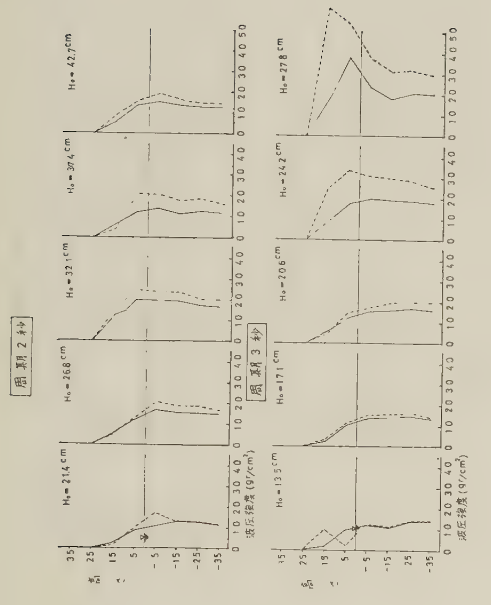


Case 9

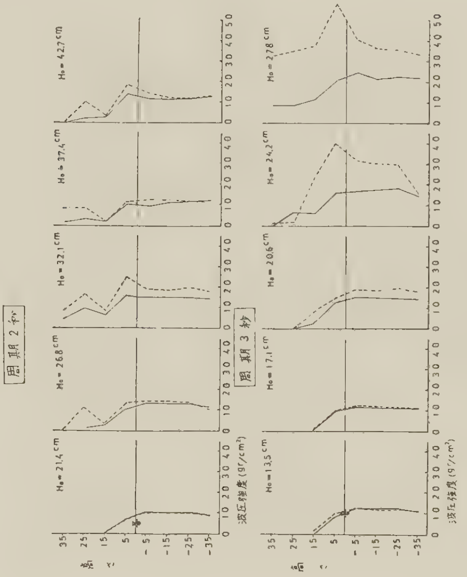


Case 11

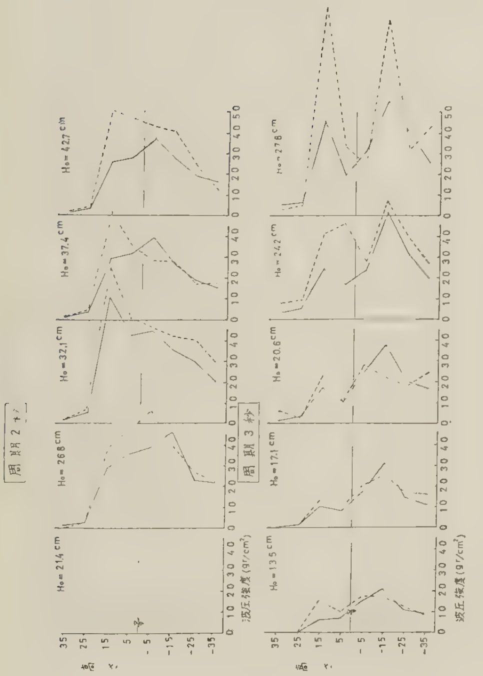
(Case 13～16) Distribution chart of wave pressure intensity.



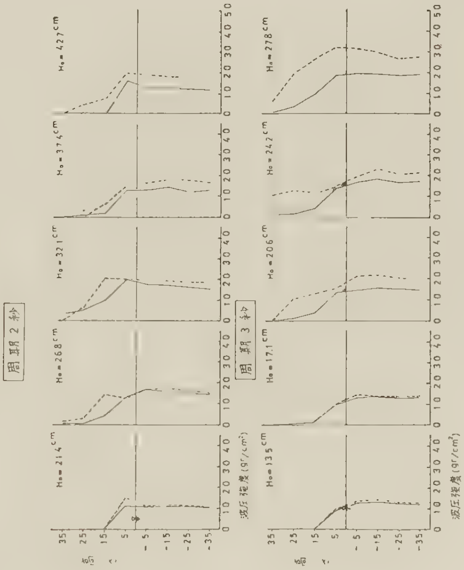
Case 14



Case 16

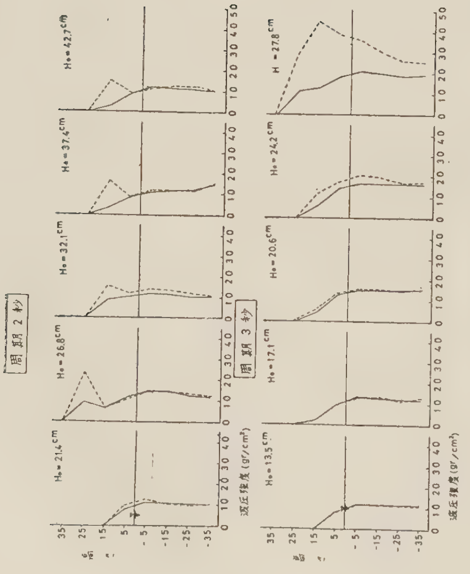


Case 13

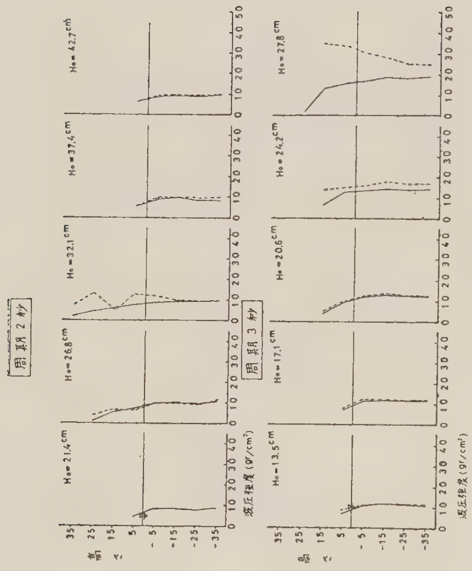


Case 15

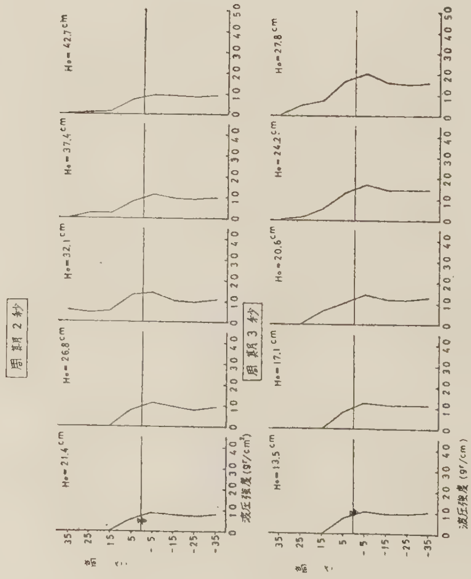
(Cose 17～20) Distribution chart of wave pressure intensity.



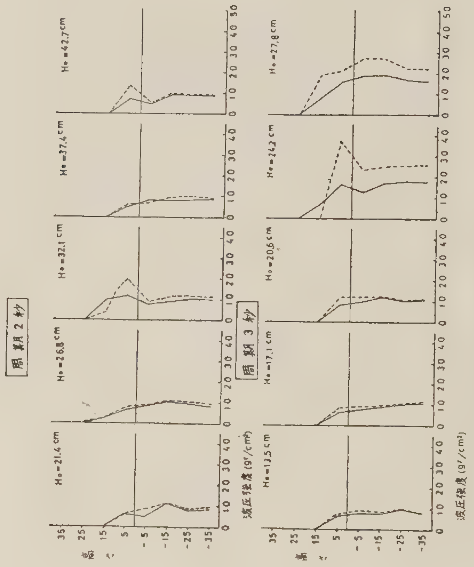
Case 17



Case 18

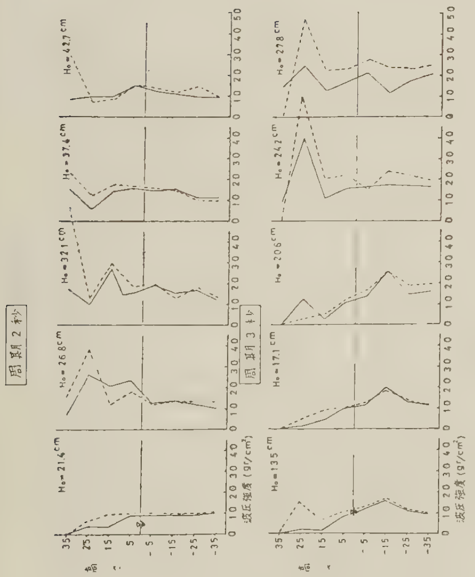


Case 19

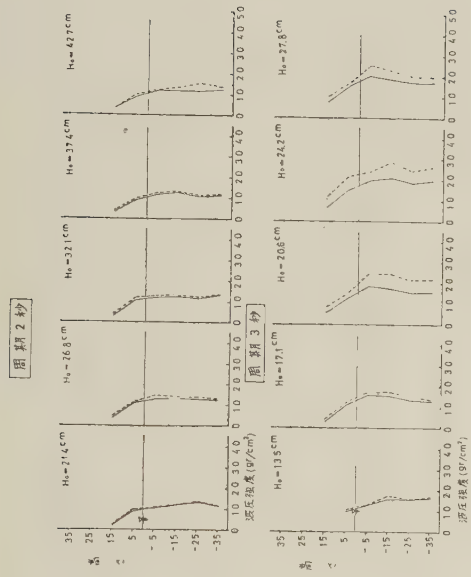


Case 20

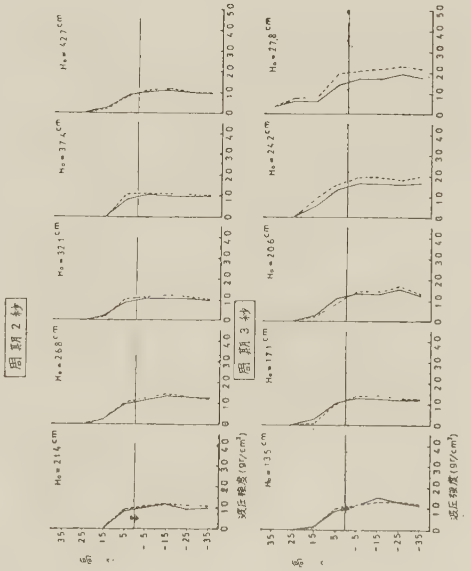
(Case21〜24) Distribution chart of wave pressure intensity.



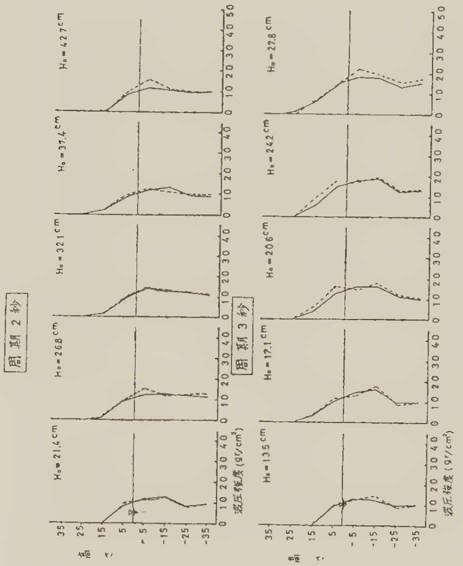
Case 21



Case 22

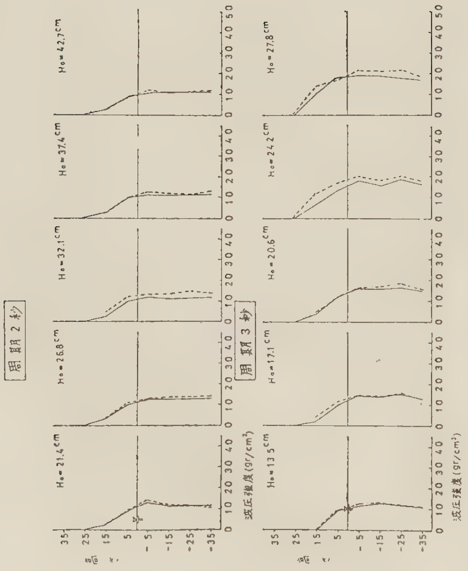


Case 23

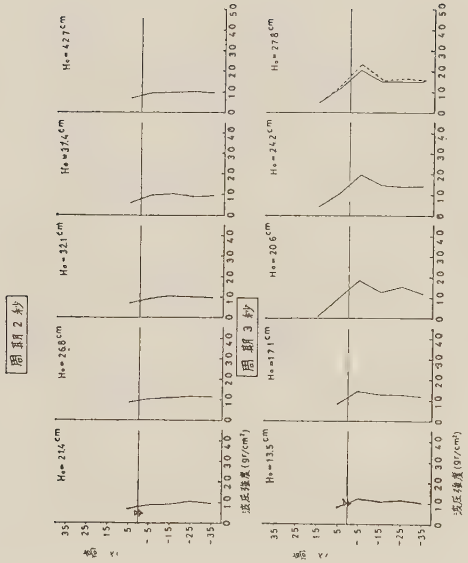


Case 24

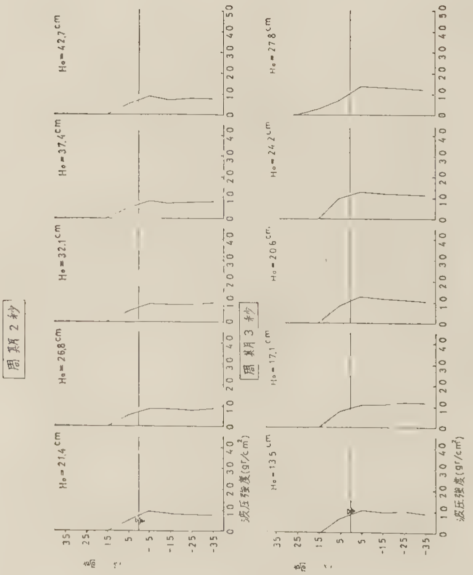
(Case 25～28)　Distribution chart of wave pressure intensity.



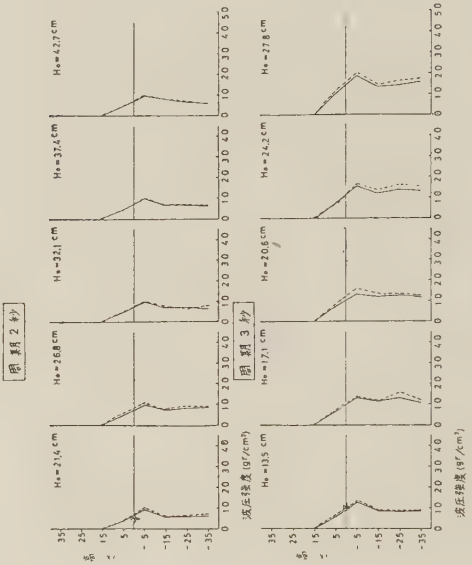
Case 25



Case 26

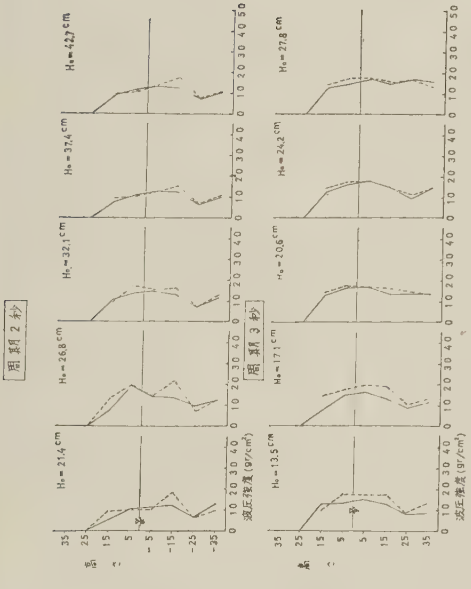


Case 27

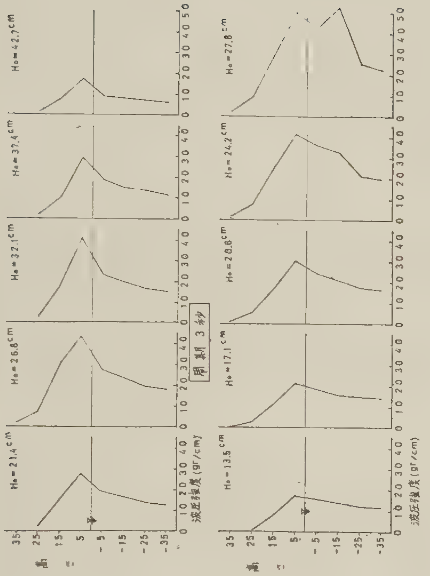


Case 28

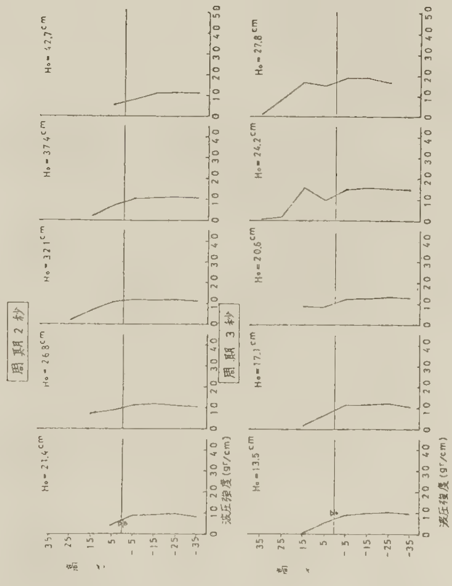
(Case 29～32) Distribution chart of wave pressure intensity.



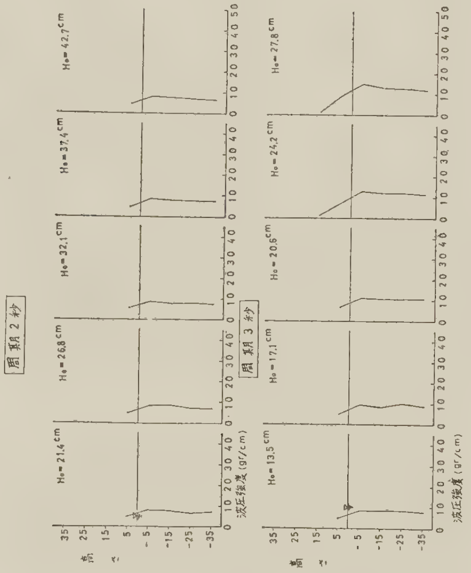
Case 29



Case 30



Case 31



Case 32

Fundamental Experiment on Dereasing Effect of Wave Pressure by Vertical-Face Absorber

By

Masaaki YAMAMOTO

Summary

In this study, the vertical-face absorber means a absorber composed of absorbing blocks compacted in a quadrilateral cage, and the wave pressure means a pressure of permeated waves through the absorber.

The following results were obtained by the experiment.

1. Scale effects appear in some cases of the experiment of small scale models in non-breaking area.
2. The absorber has large effect for absorbing shock pressure. In non wave overtopping cases, for example, a case of the width of the absorber is 40cm (0.07 L, L: wave length), a part of shock pressure begins to disappear.
3. An appropriate height of the absorber is decided based on a wave period and a width of it.

   There are three cases in accordance with the height of the absorber.

   * In the first case, no wave overtopping allowed, the distribution of pressure is almost same to that of static pressure of water whose depth is equal to the still water level plus wave crest of the case.

   * In the second case, wave overtopping allowed, no strong wave pressure is observed.

   * In the third case, the height of the absorber being lower than the still water level of the experiment, breaking of waves is promoted and the shock pressure is larger than the case of no vertical face absorber.
4. If the height of the absorber is high enough to allow no wave overtopping and B/L is greater than 0.1, an increase of wave pressure is observed in proportion to the wave length and in inverse proportion to the width of the absorber.
5. The difference of wave pressures according to the shape of each block composing the absorber is little. And the pressure decreases when each block of the absorber is replaced with smaller one.

   For example, in the case that the size of each block is 1/2 (the ratio of weight is 1/8) of an other case, the total pressure of the half size case decreases approximately 30% than the other.
6. When there is no wave overtopping, the wave pressure is uniformly distributed below the still water level, and triangly above the still water level. The pressure in the part of uniform distribution (p_1) is able to be represented by the *eq*. (26).

水工研報告　3
1982 pp.127〜142

遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究

西　裕司*・山本正昭*

目　次

1．緒　言……127
2．現在迄の研究について……127
3．実験施設および実験器具……128
4．実験方法……128
5．実験結果……132
6．解析および考察……133
7．結　言……136
参考文献……136
Summary……138
付　表……139

1．緒　言

本論文は水産工学研究所漁港水理研究室において前年度に引き続き55年度に行なった水産庁防災海岸課からの依頼研究について両年度の成果をとりまとめ報告する。

海岸護岸の基本的役割は来襲する高潮や波浪からその内側の人命や財産を守ることである。この役割の為には海水が海岸護岸の内側にできる限り侵入しないよう工夫しなければならない。また，特に漁港区域内においてはその内側に住む住民の生活が海と密接に係わっているため，漁港施設ではないにしても，護岸の天端高をできる限り低くおさえ，生活の利便を妨げないようにする工夫も必要である。従って，この2つの異なる目的を満すには天端高が低く越波量の少ない工法が必要とされている。

このような工法はいくつか考えられるが，本論文では護岸前面から消波工を離して設置する工法，そのなかでも実際の海岸護岸が設置されることの多い，砕波領域におけるものを対象とする。前年度の研究によると海底勾配が1/20という一種類の実験であったが，この工法は消波工を護岸に接して設置する従来の消波護岸に較べて越波量減少に効果があることがわかった。そこで，本研究においては，海底勾配がそれより急な場合，緩い場合として1/10と1/50の場合の実験を行ない，1/20の場合と同様の効果があるかを調べる。さらに，この工法の不規則波に対する効果も考察する。

2．現在迄の研究について

遊水部を有する消波工付護岸に関連する現在までの研究には，井島・奥薗・湯村・坂井による「遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸[4]」，菅原・長野による「直立透過堤による波の反射・透過に関する研究[5]」，合田・岸良による「不規則波による低天端型護岸の越波特性実験[6]」，佐伯，菊地，京谷，松井，尾崎による「分離式防波堤の水理機能と設計波圧について[7]」，西，山本による「遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する実験的研究[8]」，影山，山本による「離岸タイプ消波工の効果について[9]」等がある。井島等，菅原等の研究を要約すると，非砕波領域においては，透過波の減少に効果的な遊水部長さは波長により決定され，遊水部長さ（l）とその水深における入射波の波長（L）との比をとると$l/L=0.25$付近で透過率は極小となり，$l/L=0.5$付近で極大となる。また合田等の研究によると，非砕波領域で入射波に不規則波を用いた場合，越波量減少に効果的な遊水部長さは波長の0.5〜0.8倍の長さであるが，消波工を護岸に接した場合との比較では必ずしも優れてはいないとされている。佐伯等の研究によると，遊水部の長さを大きくしてゆくと波圧が減少する傾向がある事が認められるが，消波工の高さを波高の0.4倍以下にした場合の遊水部をもつ消波工付防波堤は消波工を防波堤に接した場合と較べて越波量が増大するとしている。

西・山本による研究を要約すると，砕波領域において規則波を用いた実験による最も有効な遊水部の長さは井島等の結果に反して$l'=0.1\,L'$であるとされている。ただし，l'は砕波により起こされた水位上昇後の遊水部の

---

* 水産土木工学部

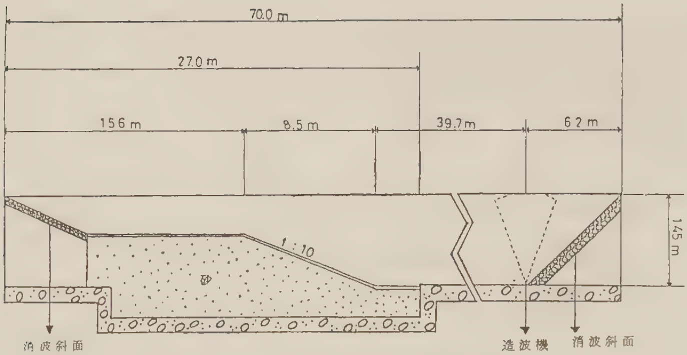


図　1　実験に用いた2次元水路

The water tank used by experiment

長さであり，L'は水位上昇後の遊水部中央の水深における入射波の波長である。また，効果についても，合田等の結果の必ずしも優れていないというのに反し，この長さの遊水部を有する場合は消波工を護岸に接した場合より0.1倍〜0.5倍に越波量が減少できるとされている。

影山等の研究によると，西等の研究と同様に遊水部を有するタイプのほうが，従来のタイプの消波工を接して設置するタイプに較べて，消波工の天端高を低くした場合で3割以下，十分な天端高がある場合では1〜2％まで越波量が減少することが報告されている。

3.　実験施設及び実験器具

実験に用いた水路は，長さ70m，幅0.7m，高さ1.45mのコンクリート製の2次元造波水路である。護岸の設置点前後は片面ガラス張りになっており，側方からの観察が可能である。水路の一端には複式フラップ型の造波機が備え付けてあり，周期0.5秒〜5.0秒，波高0m〜0.35mの規則波を発生させることができ，スティープネスの最大値は1/10である。又，水路の両端には直径10cm程度の玉石をL型鋼の桟の上に敷き並べ，消波斜面としている。

海底模型床は水締めした砂で基盤を製作し，その上部に厚さ3cmのモルタルを打設した一様勾配固定床である。また，造波板前面から39.7mの間は水平床で，そこから8.50m，9.33m，10.00mと一様勾配斜面を作り，護岸設置水深を変化させることにした。この，模型床の中にホースを設置し，越波した水を護岸の背後から護岸前面にもどし，護岸前面の水深を一定に保つことにした。

護岸の模型は厚さ1.6cmの合板で作り，模型床の中に埋め込まれた形となっており，実際の製作手順としては護岸模型を設置したあと模型床表面を製作している。なお，護岸と水路側壁とのすき間にはスポンジを詰め，水漏れ及び砂の吸い出しを防いだ。

消波ブロックには，大きさの異なる3種類の異形ブロック，2000g，1000g，800gのものを用いた。

越波量の測定は縦31cm，横50cmの枠を太い針金で作り，その枠にビニール袋を取り付け，越波する水をそれに受け取り，越波した水の入った状態と，空の状態との重量の差から越波量を求めることにした。この重量測定に用いた秤の最小目盛りは100gで，その下の位まで目測で求める。

波高は容量式波高計で測定し，それをマルチコーダに記録した。

水位の設定にはポイントゲージを用い，設定水位から±1mm以内の水位で実験を行った。

解析には水産工学研究所の電子計算機を用い，ペン書きの記録は波形読取り装置で，紙テープに変換し用いた。実験データおよび解析結果はラインプリンタにより作表し，一部のグラフはXYプロッタを用いて図化した。

4.　実験方法

実験は予備実験と本実験に分けて行なった。予備実験は，波高記録をとる場合と越波量を測定する場合の有効測定時間を調べ，造波機の設定ストロークと模型での沖波の関係を調べることを目的としている。本実験は消波工を護岸に接して設置する場合と$l'/L'=0.1$となるよう

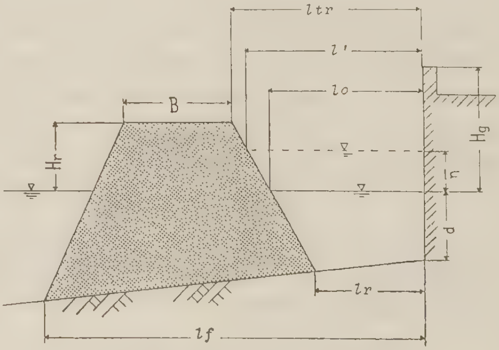


図　2　護岸，消波工付近の使用記号

The used symbols nearby the seawall and the absorber

表 1　使用記号

The used symbols

記号	内容
B	消波工天端幅
BLK	使用ブロックの種類
c	波速
c_0	沖波波速
c_g	群波波速
$EX.NO$	実験番号
f	波の周波数
g	重力加速度
h	水深
H	波高
$\overline{H}$	平均波高
H_0	沖波波高
$(H_{1/3})_0$	沖波有義波高
H_g	護岸天端高
H_r	消波工天端高
i	海底勾配
k	波数
K_D	ブロックの種類による所要ブロックの係数
K_s	浅水係数
L_0	沖波波長
l_0	離岸距離
L	波長
l'	水位上昇を考慮した遊水部の平均水面長さ
L'	水位上昇を考慮した遊水部中央の水深での入射波長
l_{tr}	消波工天端背面と護岸までの距離
l_r	消波工の背面堤脚位置（護岸より）
l_f	消波工の前面堤脚位置（護岸より）
Q	10波の測定越波量
q_{exp}	推定越波量
S_{xx}	ラジエーションストレス
T	波の周期
W	消波ブロックの重量
W_D	水路幅
η	遊水部の平均水位上昇量
θ	消波工の法面の水平となす角度
ρ	水の密度
ρ_d	ブロックの密度

に消波工を護岸から離して設置した場合の越波量の比較実験である。

今回用いた使用記号を表1に示す。

4.1　予備実験

(1)　模型縮尺

模型と現地想定との相似を考える場合，重力と粘性の両方に考える現象が影響される場合にはその模型の縮尺は1／1，つまり模型と現地想定とおなじ大きさのものになる。ところで水の粘性の影響としては固定床の場合，底面摩擦による波高減衰を考えると，水深と沖波波長比 h/L_0 が0.02の地点で10％以上の波高減衰を許さないとすれば，海底勾配1／10の場合 $T\geqq 0.3$ 秒の実験波を用いれば良い。今回の実験波には $T=2.0$ 秒を考えたので粘性を無視して重力に関する力の相似であるフルードの相似律を用いる。

また，今回の実験は越波実験であるが，一般に波力に関する実験に用いられる縮尺1／10〜1／30のうち，昨年度の実験と同じ縮尺1／30を用いることにした。

次に，フルード相似律を用いて模型周期の2秒を現地想定の周期に直すと

$$\frac{t_p}{t_m}=\left(\frac{l_p}{l_m}\right)^{1/2} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

t_p：現地想定の時間

t_m：模型の時間

l_p：現地想定の長さ

l_m：模型の長さ

$$t_p=\sqrt{30}\times 2=10.95\fallingdotseq 11.0\text{秒} \cdots (2)$$

となる

護岸の設置水深を現地想定で±0 mおよび−2 mにした。これが模型では±0 cmおよび−6.7cmとなる。

(2)　有効測定時間

この水路の場合，反射波により測定が影響されない時間を計算すると，波高測定は造波機を動かし始めた後，8秒から34秒の間の13波が測定可能であり，越波量測定は32秒から59秒の間の13波が測定可能である。

(3)　沖波波高

造波機から13.20m離れた水深1.000mの地点での波高から沖波波高を求める。換算沖波波高は次式で求める。

$$K_s=\frac{H}{H_0}=\sqrt{\frac{1}{2n}\cdot\frac{c_0}{c}} \cdots\cdots\cdots (3)$$

$$c/c_0=\tanh\ (2\pi h/L) \cdots\cdots\cdots (4)$$

$$n=\frac{1}{2}\left\{1+\frac{4\pi h/L}{\sinh\ (4\pi h/L)}\right\} \cdots\cdots\cdots (5)$$

H：波高計を置いた地点の波高

L：波高計を置いた地点の波長

h：波高計を置いた地点の水深

c：波高計を置いた地点の波速

c_0：沖波波速

H_0：換算沖波波高

K_S：浅水係数

造波機のストロークを10mm～90mmまで10mmずつ変えて波高Hを測定し，その値から（3）式を用いて換算沖波波高H_0を求めた。その際に波高測定は，記録された波高をキャリブレーションの値から実際の波高に直し，有効測定時間内の10波程度の波高を平均して，そのストロークでの波高とした。その際に各ストロークと換算沖波波高との関係から，最小2乗法を用いて3次曲線で近似しグラフに示した。（図3）

沖波波高を6.7cm，10.0cm，13.3cm，16.7cm，20.0cm，23.3cmとして，このグラフからストロークを求めるとそれぞれ23.6mm，34.2mm，44.4mm，54.4mm，64.6mm，75.0mmとなった。

4.2　本実験

(1)　護岸天端高

海岸保全施設築造基準解説によると海岸護岸の所要天端高の基準が示されている。それによると今回実験する護岸設置水深－2mの場合，消波工がなく海底勾配$\frac{1}{10}$の時は基準に示す天端高は$2.1H_0$～$0.58H_0$（H_0は沖波波高）標準の値である目安の値では$1.38H_0$である。消波工を設置する場合の（ブロック2個並び）護岸の天端高は消波工のない場合の高さに0.7を掛けるので$1.47H_0$～$0.406H_0$となり，目安の高さは$0.966H_0$となる。今回の実験は，消波工が2個並びのブロックでつくられ，沖波波高を5mに設定したので，護岸の目安の高さは4.8mである。又，消波工のない護岸天端高（目安高さ）に0.6を掛けた4.1mの場合も実験した。これらの値を模型に直すと16.0cmと13.7cmである。

(2)　消波工天端高

海岸保全施設築造基準によると消波工の所要天端高の基準が示されている。それによると消波工の天端幅がブロック2個並びの場合，消波工の所要天端高は，先に述べた消波工付護岸の天端高に0.8を掛けたものである。

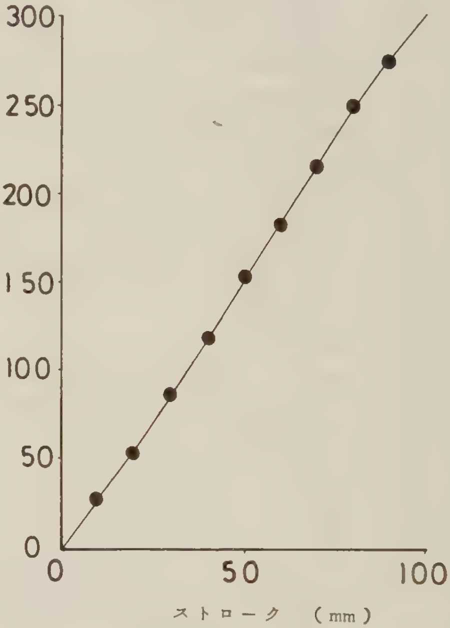


図 3　造波機のストロークと沖波波高の関係（勾配1／10）

The relationship of the stroke of wave generater and the offshore wave height

表 2　実験諸元

The assortment of experiments

諸元		記号	模型						現地想定					
想定縮尺			1／30											
海底勾配		i	1／10				1／50		1／10				1／50	
護岸	設置水深	d	－6.7		±0.0		－6.7		－2.0		±0.0		－2.0	
	天端高	H_g	＋13.7	＋16.0	±15.2		＋11.2		＋4.1	＋4.8	＋4.6		＋3.4	
消波工	天端高	H_r	＋11.3	＋12.8	＋12.1		＋5.3	＋0.1	＋3.4	＋3.8	＋3.6		＋1.6	±0.0
遊水部長さ		l'	22.3		15.8		19.3		6.7		4.7		5.8	
沖波	波高	H_0	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	23.3	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
	周期	T	2.0						11.0					

単位：模型はcm及びsec，現地想定はm及びsec

護岸設置水深が－2 m で，護岸の高さが 4.1m，および 4.8mのときの消波工天端高は，3.4m（模型11.3cm）および3.84m（模型12.8cm）とした。

(3)　消波ブロックの重量

消波ブロックの重量は，ハドソン公式から求める方法がある。次にハドソン公式を示す。

$$W \geqq \frac{\rho_d H^3}{K_D\ (\rho_d/\rho-1)^3 \cot\theta} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

異形ブロックで $h < 1.5H$ の場合で $K_D = 6.6$，$\rho_d = 2.30$，$\rho = 1.03$，$\cot\theta = \frac{4}{3}$ として考えると

$$W \geqq \frac{1.03 \times H^3}{6.6 \times \frac{4}{3} \times (1.23)^3} = 0.063H^3 \cdots\cdots (7)$$

となる。

Hに沖波波高を 6 m，海底勾配 $\frac{1}{10}$，水深が－2 mの条件を用いると

$W = 16.25$ t

となる。これを模型に換算すると

$W' = 601.7$ g

となる。従って 700 g 以上の異形ブロックの模型を用いる必要がある。しかし護岸設置水深が－2 mの場合，実験では 1 kgのブロックを使っても不安定であった。そこで，それより 1 つ上のランクの 2 kgのものを必要に応じて使った。

(4)　水位上昇量

水位上昇量を決定するのに菅原等[3)]の規則波の浅水変形計算モデルの水位上昇の資料を引用した。

wave-set-upはradiation stress によって引き起こされる。radiation stress S_{xx} は

$$S_{xx} = E\left(\frac{2kh}{\sinh\ 2kh} + \frac{1}{2}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

E：平均エネルギー　$\frac{1}{8}\rho g H^2$

h：水深

k：波数　$(2\pi/L)$

である。運動量の釣り合いから平均水位の変化量 η に関する方程式(9)が得られる。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho g(h+\eta)\frac{d\eta}{dx} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

または

$$\frac{d\eta}{dx} = -\frac{1}{(h+\eta)} \cdot \frac{d}{dx}\left[\frac{1}{8}H^2\left(\frac{2kh}{\sinh\ 2kh} + \frac{1}{2}\right)\right] \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

(10)式から波高の 2 乗の変化が求められれば平均水位の変化が計算される。

「規則波の浅水変形計算モデル」では(10)式を(11)式に書き換えたものを用いている。

$$\eta_{i+1} = \eta_i - \left(\frac{K_E}{n+h}\right)_{i+½} (H^2{}_{i+1} - H^2{}_i) \cdots\cdots (11)$$

$$K_E = \frac{1}{8}\left(\frac{2kh}{\sinh\ 2kh} + \frac{1}{2}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

このサフィックスの $i+\frac{1}{2}$ は h_i と h_{i+1} の中央点における値を意味している。この資料と昨年の研究の資料とを横軸を h/H_0，縦軸を η/H_0 にしたグラフに示した。（図 4 ～図 7 ）

このグラフから h/H_0 が 0 ～1.0の間は η/H_0 の値がグラフの $h/H_0 = 0$ における値とほぼ同じである。従って，遊水部中央における wave-set-up は h/H_0 が 0 の点と同じ量に見積ることにした。$H_0 = 5$m で h/H_0 が 0 の wave-set-upは1.69m（模型5.6cm）である。

(5)　遊水部の長さ

昨年度の研究から，遊水部の長さが $l' = 0.1L'$ と護岸に接して消波工を設置した場合と較べて0.1倍～0.5倍に越波量の減少が期待できるという結果があるがこれから $l' = 0.1L'$ を遊水部の長さとした。遊水部の長さの求め方は，ある値を l' におき，その中間での水位と wave-set-upを加えた水深での波長 L' を求める。その L' からさらに l' を求める。この方法で $l' = 0.1L'$ になるまで繰

表 3　使用ブロックの諸元

The assortment of used blocks

記　号	種別 (g)	重量 (g)	体積 (cm³)	単位体積重量 (g/cm³)
BLK1	2000.0	1922.0	778.0	2.47
BLK2	1000.0	1018.0	398.0	2.56
BLK3	800.0	824.0	400.0	2.06
BLK4	800.0	876.3	394.0	2.33
BLK5	700.0	758.6	322.4	2.34
BLK6	120.0	128.3	54.9	2.35
BLK7	60.0	63.7	27.4	2.22

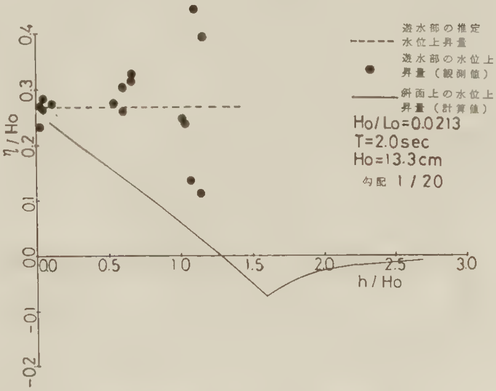


図 4　観測値と計算値の水位上昇量の比較(1)

The comparison the observed values with the calculated values of wave-set-up(1)

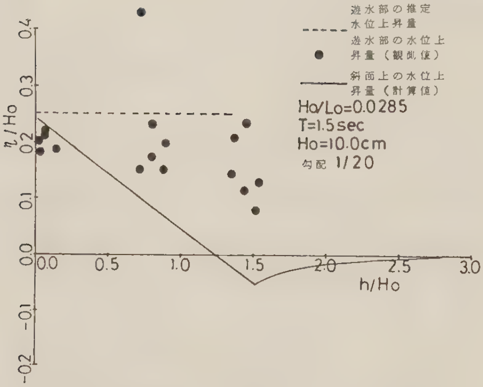


図 5　観測値と計算値の水位上昇量の比較(2)
The comparison the observed values with the calculated values of wave-set-up(2)

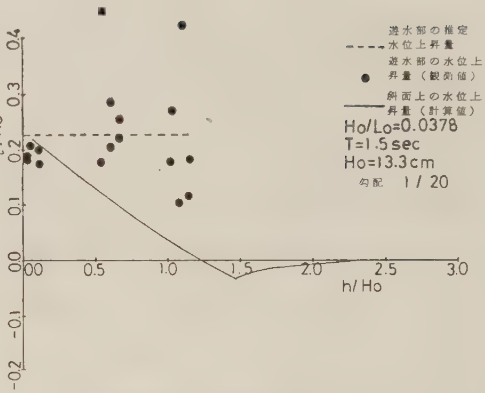


図 7　観測値と計算値の水位上昇量の比較(4)
The comparison the observed values with the calculated values of wave-set-up(4)

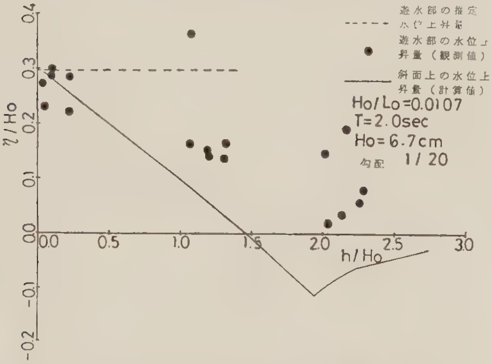


図 6　観測値と計算値の水位上昇量の比較(3)
The comparison the observed values with the calculated values of wave-set-up(3)

り返し計算を行なう。計算の結果，護岸水深が−2 mの場合，遊水部の長さは6.7m（模型22.3cm）となった。ただし消波工の背面の傾斜を3/4とした。これは一般に消波工の法勾配として使われているものである。$l'=6.7$ mの場合消波工背後法面と静水面との交点は，護岸より4.43m（模型14.8cm）の位置となる。

(6)　越波量の測定方法

越波量の測定には，重さがわかっている越波測定袋で第6波目から第15波目までの越波量を取り，それを重さがわかっているプラスチックケースに入れて台秤で測定した。これから越波量の重さを求めた。尚，越波量の測定は，同じケースを2回繰り返した。

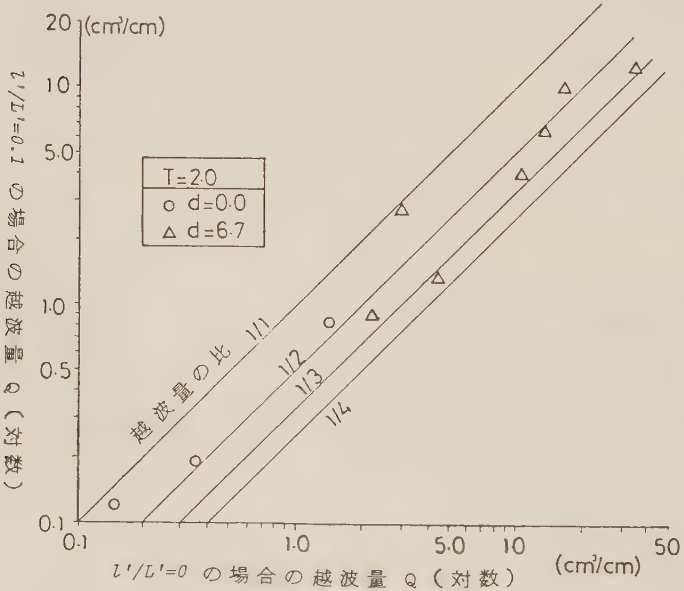


図 8　$l'/L'=0$と$l'/L'=0.1$の場合の越波量の比較（$i=1/10$）
The comparison the overtopping values of the case $l'/L'=0$ with that of case $l'/L'=0.1$ ($i=1/10$)

5.　実験結果

実験結果を付表に示すが，これを見ると勾配が1/10の場合も1/50の場合も，$l'/L'=0.1$の実験は$l'/L'=0$の実験に較べて越波量が少ないことが分る。なお，付表1には今回の測定結果を加えて昨年度の研究のデータを同時に電算処理する為にのせてある。

図8，図9に1/10勾配及び1/50勾配の$l'/L'=0$と$l'/L'=0.1$の場合の越波量の比較を示す。また前回に示した1/20勾配の越波量の比較を参考の為図10に再び示す。これらの図には越波量の比の値を補助線として記入した。これらの図によると，1/20勾配の場合に較べて越波量は1/10勾配の場合多く，1/50勾配の場合少ない。

1/10勾配の場合，護岸設置水深が深くなると越波量は極めて多くなる。ま

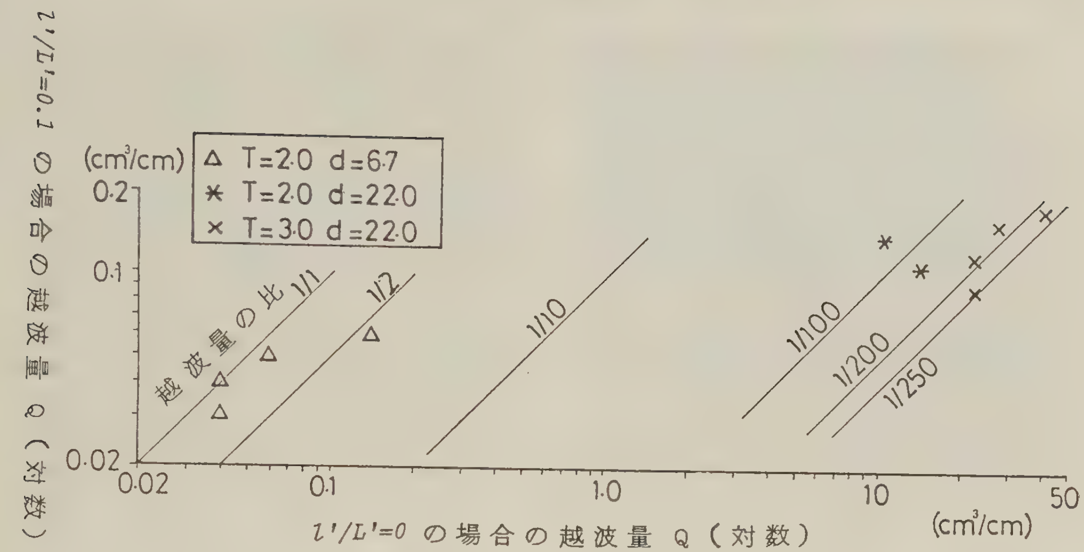


図 9　$l'/L'=0$ と $l'/L'=0.1$ の場合の越波量の比較（$i=1/50$）
The comparison the overtopping values of the case $l'/L'=0$ with that of case $l'/L'=0.1$ ($i=1/50$)

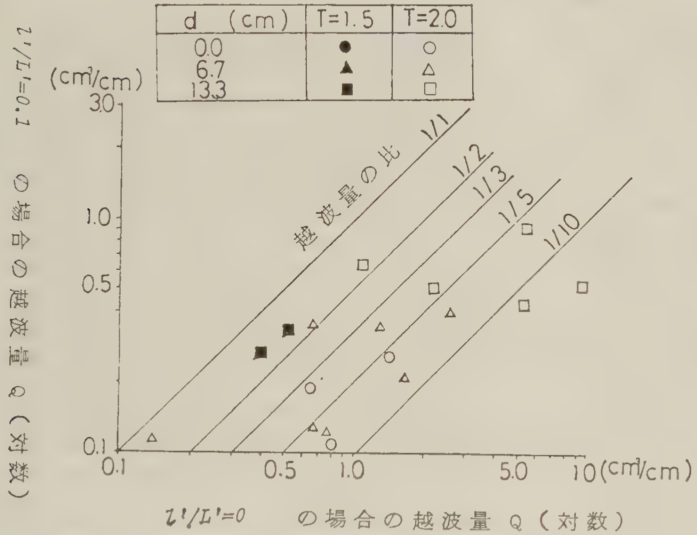


図 10　$l'/L'=0$ と $l'/L'\fallingdotseq 0.1$ の場合の越波量の比較（$i=1/20$）
The comparison the overtopping values of the case $l'/L'=0$ with that of case $l'/L'=0.1$ ($i=1/20$)

た，1/20勾配の場合に見られた，越波量が多くなるほどこの工法の効果が大きくなるという現象は1/10勾配においては見られなかった。

一方，1/50勾配の場合，他の2種の勾配と同様に越波量が毎秒 0.1cm³/cm 以下のデータを省くとすると描くべき点がなくなるので，この場合は毎秒0.02cm³/cm 以上のデータを採用した。それに加え，影山等の「離岸タイプ消波工の効果について[9]」で述べられたデータを✱及び×印でマークすると，越波量が多くなると，1/20勾配の場合よりこの工法の効果が大きくなることが分る。

この2枚の図より，消波堤付護岸の越波量は消波工付護岸に較べて1/10勾配の場合越波量は 1/2 から 1/3 に減少し，1/50勾配の場合，越波量が少ない場合約8割から5割に減少するだけで効果は少ないが，越波量の多い場合，最大1/250まで減少する。

6.　解析および考察

今回の実験結果と参考にした資料は，規則波を用いた越波実験結果である。これを不規則波に関するものに変換する方法を考えてみる。

実際の海の波は波高，周期とも時間とともに変化する不規則波である。このような不規則な波を表現する方法に統計的な代表値によって表わす方法と波高，周期，エネルギー等の分布によって表現する方法がある。一般に漁港海岸の設計波として用いられているのは前者の方法で，そのなかでも有義波とよばれる代表波である。これは波高の大きな方から数えて全体の波数の 1/3 の波の波高と周期を平均した代表波である。

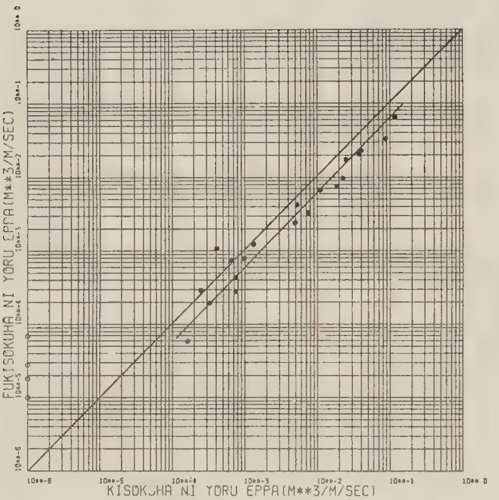


図 11　有義波と規則波の越波量の比較（$i=1/10$）
The comparison the overtopping values by significant wave height with that by regular wave height ($i=1/10$)

もう一つの方法のうち，周期の変動の少ない波の場合，その波高の分布は次のようなレーリー分布となる。

$$P_r\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)=\frac{\pi}{2}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)\exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\}\cdots\cdots(13)$$

また平均波高$\bar{H}$と有義波高$H_{1/3}$ の関係は次のように表わすことができる。

$$\bar{H}\fallingdotseq 0.625H_{1/3}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

この 2 つの方法から所要の有義波高に対する越波量を次のようにして求めた。

まず(14)式で所要の有義波高から平均波高を求め，その平均波高の 3 倍以下の範囲を現地想定の波高で0.0m，0.5m，1.5m，2.5m，……と 1 mおきの波高で区切り，その各区間の代表波高を，その区間の中央の値，0.25m，1.0m，2.0m，3.0m，……とし，その代表波高の出現する確率を(13)式を変形した次式で計算した。

$$P(H)=\exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

ただし，$P(H)$ はHよりも大きな波高が出現する確率

平均波高の 3 倍 以下の範囲とした理由は，$H/\bar{H}=3$ で(15)式の値は 0.085％ となり，ほとんど 0 とみなせると考えた為である。こうして求めた確率を規則波による実験の越波量に掛け，それらをすべて合計し，その有義波高に対する越波量とした。ただし，付表波高に対応する実験を行なっていない場合は，それに最も近い波高の実験結果 2 つを両対数グラフ上でむすびそれを延長して推定した。

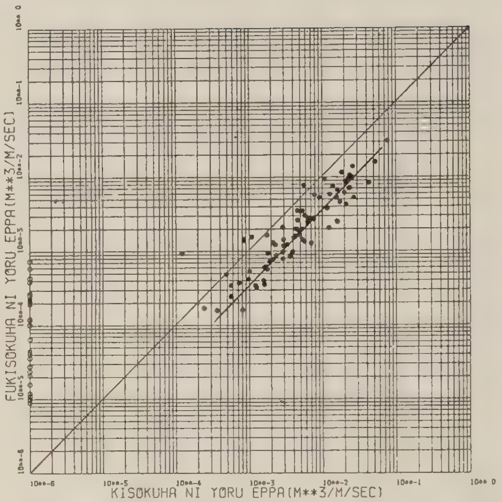


図 12　有義波と規則波の越波量の比較（$i=1/20$）
The comparison the overtopping values by significant wave height with that by regular wave height ($i=1/20$)

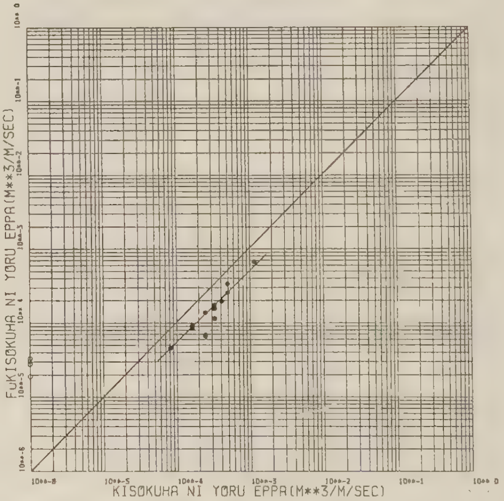


図 13　有義波と規則波の越波量の比較（$i=1/50$）
The comparison the overtopping values by significant wave height with that by regular wave height ($i=1/50$)

こうして求めた有義波高に対する越波量と同じ値の規則波で実験した越波量との比較を図11～図13に示す。その時実測率が約 5 割に満たない点は図化する段階ではぶいた。実測率とは有義波高に対する越波量のなかで推定した越波量によらず実験越波量から直接求めた部分の割合のことである。

なお，この方法による解析の例として現地想定の有義波高 4 mの解析結果の一部を表 4 に示す。

表4　有義波高4 mの場合の解析例（一部分）

Partial example of analysis that significant wave height is 4 m

EX No.	i	d	Hg	Hr	l'	Ho	T	q (cc/波/cm)	$q\sqrt{2gHo^3}$	q' (m³/波/m)	q'' (m³/sec/m)	レイリー率(R)	R×q	R×q''	実測率
10.011	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	6.7	2.0	0.09	0.000021	0.0081	0.000739	0.297775	0.026800	0.000220	0.029470
10.012	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	10.0	2.0	0.60	0.000139	0.0540	0.004929	0.241424	0.144855	0.001190	0.159288
10.013	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	13.3	2.0	2.29	0.000531	0.2061	0.018814	0.136017	0.311479	0.002559	0.342515
10.014	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	16.7	2.0	3.05	0.000707	0.2745	0.025058	0.056157	0.171277	0.001407	0.188344
10.015	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	20.0	2.0	10.70	0.002481	0.9630	0.087909	0.017396	0.186135	0.001529	0.204682
10.016	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	23.3	2.0	16.63	0.003856	1.4967	0.136629	0.004094	0.068084	0.000559	0.074868
													0.909386	0.007471	0.999168
20.151	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	6.7	2.0	0.22	0.000051	0.0199	0.001812	0.297775	0.065686	0.000540	0.116692
20.152	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	10.0	2.0	0.56	0.000130	0.0503	0.004591	0.241424	0.134914	0.001108	0.239676
20.153	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	13.3	2.0	2.13	0.000493	0.1912	0.017459	0.136017	0.289036	0.002375	0.513477
20.154	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	16.7	2.0	0.96	0.000222	0.0860	0.007853	0.056157	0.053679	0.000441	0.095362
													0.562899	0.004625	0.965207
50.016	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	6.7	2.0	0.01	0.000002	0.0009	0.000082	0.297775	0.002978	0.000024	0.178391
50.017	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	10.0	2.0	0.02	0.000005	0.0018	0.000164	0.241424	0.004828	0.000040	0.289266
50.018	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	13.3	2.0	0.03	0.000007	0.0027	0.000246	0.136017	0.004081	0.000034	0.244456
50.019	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	16.7	2.0	0.05	0.000012	0.0045	0.000411	0.056157	0.002808	0.000023	0.168212
50.020	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	20.0	2.0	0.06	0.000014	0.0054	0.000493	0.017396	0.001044	0.000009	0.062529
													0.016692	0.000137	0.942853

これによると有義波高に対する越波量は規則波の同じ波高に対する越波量より少なめで，勾配が1/10の場合約60%，1/20の場合約30%，1/50の場合約50%を中心に分布していることがわかる。

今回の研究においては不規則波を用いた実験による検証は行っていないが，合田の研究1,2)によると，この変換方法により求めた不規則波による砕波領域における直立護岸の推定越波量と実際に不規則波を用いた越波量がよく一致することが報告されており，今回の場合も現実とあまり違いがないと考えられる。

次に越波量に影響を与えると考えられる要素を上げると海底勾配，沖波波高，周期，護岸の設置水深，護岸の天端高，消波工の天端高，護岸と消波工の法面勾配，消波工の幅，そして遊水部の長さなどがある。このうち今回の実験では護岸は直立壁，消波工の法面勾配は3/4，消波工の天端幅は2個並びと設定したので，比較はできない。また，消波工の高さH_rは護岸の高さH_gにほぼ一定の率を掛けて設定したため，単独には比較できない。従って，縦軸に無次元越波量$q_{exp}/\sqrt{2g(H_{1/3})^3}_0$，横軸に沖波有義波高$(H_{1/3})_0$と護岸設置水深$d$との比をとり，それぞれ海底勾配，沖波周期別に別葉に，遊水部長さが$l'=0$と$l'=0.1L'$の場合の比較を行なった。このグラフ中の数字は$H_g/(H_{1/3})_0$の値でこれが約1から1.5の範囲の点で実測率が50%以上の点のみプロットしてある。

なお海底勾配が1/50の場合は，測定越波量が極めて少なく，$l'=0$と$l'=0.1L'$の場合の比較資料として不適当と考え，作図はとりやめた。

図14は$i=1/20$，$T=2.0$sec，H_r/H_gが0.5から0.6の範囲の比較であるが，$l'=0$の場合に較べて$l'=0.1L'$の場合$H_g/(H_{1/3})_0=1$のときで無次元越波量は0.1～0.5倍になり，$H_g/(H_{1/3})_0=1.5$のとき0.1～0.3倍に減少している。参考のために合田による推定線をのせてあるが，条件は同じ$l'=0$，$H_g/(H_{1/3})_0=1$の本論の推定線に較べ，無次元越波量が少なく，波高が増大すると，その差が大きくなり，越波量を過小に見積ることになり，危険である。この違いは，本論の推定線は砕波領域における実験結果により推定したものであり，合田のは重複波領域における実験結果を用いて砕波領域の推定まで行なったためと思われる。

図15は，$i=1/10$，$T=2$sec，H_r/H_gが0.78から0.83の範囲の比較であるが，無次元越波量は$l'=0$の場合に較べて$l'=0.1L'$の場合の方が$H_g/(H_{1/3})_0=1$のとき0.3～0.6倍，$H_g/(H_{1/3})_0=1.5$のとき0.3倍になる。

1/50勾配の実験の場合，海岸保全施設築造基準により設定した消波工高さではまったく越波がおこらず，それを極端に低くした場合に0.0001m³/m･sec程度の越波量しかなく，想定した越波量にオーダーとしても満たなかった。これは砕波の進行により，護岸に波が到達するまでに波のエネルギーが減殺され，それに伴い，越波量の低減効果があったため，この工法による越波量減少を期待する必要がなくなったものと考えた。

想定した越波量とは，合田により示された背後が舗装された護岸の被災限界値約0.2m³/m･secを考えた。たとえば1/10勾配の現地想定の越波量は沖波波高5 mの場合0.12m³/m･sec以下であり，絶対量はやや少ないが，オーダーとして一致している。

7. 結　言

砕波領域において規則波による越波実験ならびに不規則波に対する期待越波量の算定を行い，次のような結果を得た。

(1)　前年度の 1/20 勾配の実験と同じく，1/10 勾配及び 1/50勾配の実験においても，$l'=0$ の場合に較べて $l'=0.1L'$ の位置に消波工を設置した場合越波量が減少することが確かめられた。この減少率は勾配 i，沖波周期 T，護岸高さと沖波波高の比 $H_g/(H_{1/3})_0$ により変化し，$i=1/10$，$T=11.0$secでは $H_g/(H_{1/3})_0=1$ のとき 0.3～0.6 倍，$H_g/(H_{1/3})_0=1.5$ のとき 0.3 倍，$i=1/20$，$T=11.0$ secでは$H_g/(H_{1/3})_0=1$ のとき0.1～0.5倍，$H_g/(H_{1/3})_0=1.5$のとき0.1～0.3倍，$i=1/20$，$T=8.3$ sec では $H_g/(H_{1/3})_0=1$ のとき0.7倍，$H_g/(H_{1/3})_0=1.5$ のとき0.8倍となった。ただし，1/50 勾配の水深が浅い場合は，$l'=0$ の場合ですでに越波量が極めて少なくなり，$l'=0.1L'$の場合，数字上では約半分というデータとなったが，この工法により越波量を減少させる必要性が少ないことがわかった。

(2)　前年度の研究では規則波の越波量のデータとしてそのまま用いたが，これを変換し，不規則波に対する越波量を算定すると，規則波のものに較べて1/10勾配で約60%，1/20勾配で約30%，1/50勾配で約50%と少ない期待越波量が得られた。

(3)　$l'=0.1L'$ とする工法では，l' および L' は遊水部の水位上昇後の遊水部長さおよび水位上昇後の入射波長であり，汀線に近い領域においてはその水位上昇量が無視できないが，その水位上昇量を算定する方法としては菅原の「規則波の浅水変形」により示された wave-set-up の算定方法により，水深 0 の点における水位上昇量として算定してよい。

(4)　この工法で残された問題点としては，消波工の基礎洗掘が考えられる。

豊島[10]によると，この工法の遊水部にあたる部分にもブロックを投入し，なるべく空けない方がよいとされている。その理由は，ここを空けておくと，表面に沿って帰るべき反射波の一部がこのくぼみにたまり，表法被覆工にそって強い戻り流れとなって根固工基礎の洗掘を助長する傾向を示すからである。

従って，基礎洗掘を考える必要のない基礎条件の場合はこの工法をそのまま用いても良いが，砂地盤等，洗掘の生じやすい基礎条件にこの工法を適用する場合はさらに洗掘防止対策工を考える必要がある。

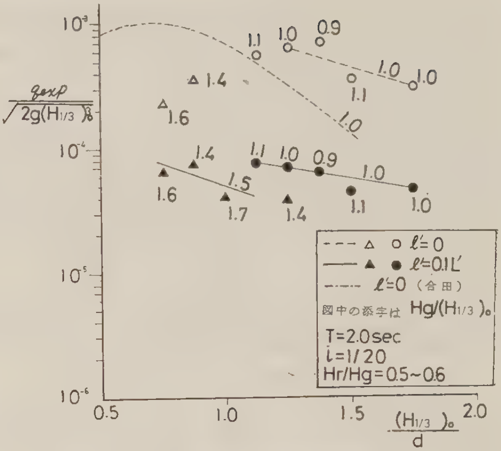


図 14　$l'/L'=0$ の無次元越波量と $l'/L'=0.1$ の無次元越波量の比較 ($i=1/20$)

The comparison the nondimensional overtopping values of case $l'/L'=0$ with that of case $l'/L'=0.1$ ($i=1/20$)

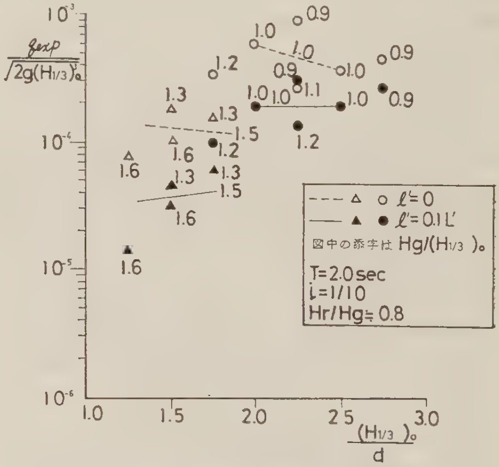


図 15　$l'/L'=0$ の無次元越波量と $l'/L'=0.1$ の無次元越波量の比較 ($i=1/10$)

The comparison the nondimensional overtopping values of case $l'/L'=0$ with that of case $l'/L'=0.1$ ($i=1/10$)

参 考 文 献

1)　合田良実・竹田英章：不規則波に対する護岸の期待越波流量について，第15回海講講演集，pp.259～266，1968

2)　合田良実：不規則波に対する護岸の期待越波流量について第 2 報，第17回海講講演集， pp.125～132 1970

3)　菅原輝男・山本正昭：規則波の浅水変形計算モデ

ル，農業土木験試場技報D第20号，pp.1〜22，1978

4）井島武士・奥薗英明・湯村やす・坂井久雄：遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸，第19回海講講演集 pp.185〜192，1972

5）菅原輝男・長野章：直立透過堤による波の反射・透過に関する研究，農業上木験試場報告第14号，pp.137〜144，1976

6）合田良実・岸良安治：不規則波による低天端型護岸の越波特性実験，港湾技研資料No.242，1976

7）佐伯浩・菊地秀明・京谷修・松井弘夫・尾崎晃：分離式防波堤の水理機能と設計波圧について，第27回海講講演集，pp.335〜338，1980

8）西裕司・山本正昭：遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する実験的研究，水工研技報水産土木第2号，pp.33〜49，1981

9）影山智将・山本正昭：離岸タイプ消波工の効果について，水工研技報水産土木第2号，pp.51〜66，1981

10）豊島修：現場のための海岸工学高潮編，森北出版 pp.272〜273，1977

Experimental Study on Overtopping over Seawall Having Remote Absorber

By

Yuji NISHI and Masaaki YAMAMOTO

Summary

Fundamental role of seawall is to protect inside inhabitants and their estates from the high-tide and the wave.

This study is about the reducting effect of overtopping by the method to construct the absorber remote from the seawall at the distance of $l'=0.1L'$. (l' is the water surface distance between the absorber and the seawall and L' is the wave length at the middle depth between the absorber and the seawall. They are both the values after wave-set-up.)

The reducting rate of overtopping by the case of $l'=0.1\ L'$ as compared with the case of $l'=0$ is changed by the grade, the wave period and the height of the seawall and the absorber.

But the rate is always below 1. The rate decreases, when the grade becomes to be gentle, when the height of seawall and absorber become to be high and when the wave period becomes to be long.

付表

EX No.	Ho	T	Q(2 times)		Wd	*i*	d	Hg	Hr	*l'*	BLK1	BLK2	BLK3	BLK4	BLK5	BLK6	BLK7
	(cm)	(sec)	(cc	)	(cm)		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(			unit			)
10.001	6.7	2.0	10	20	70	1/10	6.7	13.7	11.3	0.0	22.0	6.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.002	10.0	2.0	270	370	70	1/10	6.7	13.7	11.3	0.0	22.0	6.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.003	13.3	2.0	1890	2650	70	1/10	6.7	13.7	11.3	0.0	22.0	6.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.004	16.7	2.0	7490	6850	70	1/10	6.7	13.7	11.3	0.0	22.0	6.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.005	20.0	2.0	17350	18580	70	1/10	6.7	13.7	11.3	0.0	22.0	6.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.006	6.7	2.0	0	0	70	1/10	6.7	13.7	11.3	22.3	23.0	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.007	10.0	2.0	30	20	70	1/10	6.7	13.7	11.3	22.3	23.0	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.008	13.3	2.0	510	840	70	1/10	6.7	13.7	11.3	22.3	23.0	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.009	16.7	2.0	2620	2340	70	1/10	6.7	13.7	11.3	22.3	23.0	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.010	20.0	2.0	6010	6840	70	1/10	6.7	13.7	11.3	22.3	23.0	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.011	6.7	2.0	20	70	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.012	10.0	2.0	360	240	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.013	13.3	2.0	1190	1100	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.014	16.7	2.0	1540	1510	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.015	20.0	2.0	6690	4010	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.016	23.3	2.0	8590	8040	70	1/10	6.7	16.0	12.8	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.017	6.7	2.0	0	0	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.018	10.0	2.0	20	60	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.019	13.3	2.0	480	420	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.020	16.7	2.0	1230	1520	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.021	20.0	2.0	2160	1840	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.022	23.3	2.0	5720	4240	70	1/10	6.7	16.0	12.8	22.3	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.023	6.7	2.0	0	0	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.024	10.0	2.0	0	0	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.025	13.3	2.0	40	50	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.026	16.7	2.0	60	100	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.027	20.0	2.0	180	170	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.028	23.3	2.0	710	700	70	1/10	0.0	15.2	12.1	0.0	0.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.029	6.7	2.0	0	0	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.030	10.0	2.0	10	10	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.031	13.3	2.0	20	20	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.032	16.7	2.0	90	30	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.033	20.0	2.0	130	60	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.034	23.3	2.0	440	400	70	1/10	0.0	15.2	12.1	15.8	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.011	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.012	10.0	2.0	30	50	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.013	13.3	2.0	430	440	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.014	16.7	2.0	1020	890	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.021	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.022	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.023	13.3	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.024	16.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.3
20.031	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.032	10.0	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.033	13.3	2.0	150	110	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.034	16.7	2.0	120	230	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.041	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.042	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.043	13.3	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.044	16.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0
20.051	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.052	10.0	2.0	400	420	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.053	13.3	2.0	1050	900	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.054	16.7	2.0	1060	1050	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.061	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.062	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.063	13.3	1.5	10	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.064	16.7	1.5	20	50	70	1/20	0.0	7.0	5.0	28.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.5
20.071	6.7	2.0	170	180	70	1/20	0.0	7.0	5.0	62.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.072	10.0	2.0	1310	1290	70	1/20	0.0	7.0	5.0	62.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.073	13.3	2.0	2070	2230	70	1/20	0.0	7.0	5.0	62.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.074	16.7	2.0	2420	1910	70	1/20	0.0	7.0	5.0	62.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.081	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	5.0	61.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.082	10.0	1.5	30	40	70	1/20	0.0	7.0	5.0	61.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.083	13.3	1.5	190	220	70	1/20	0.0	7.0	5.0	61.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.084	16.7	1.5	380	440	70	1/20	0.0	7.0	5.0	61.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.5	0.0
20.091	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.092	10.0	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.093	13.3	2.0	40	70	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.094	16.7	2.0	470	620	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0

EX No.	Ho	T	Q(2 times)		Wd	i	d	Hg	Hr	l'	BLK1	BLK2	BLK3	BLK4	BLK5	BLK6	BLK7
	(cm)	(sec)	(cc)		(cm)		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(			unit			)
20.271	6.7	2.0	70	100	70	1/20	6.7	11.3	10.0	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.272	10.0	2.0	70	70	70	1/20	6.7	11.3	10.0	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.273	13.3	2.0	440	240	70	1/20	6.7	11.3	10.0	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.274	16.7	2.0	110	70	70	1/20	6.7	11.3	10.0	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.281	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.282	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.283	13.3	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.284	16.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.291	6.7	2.0	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.6	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.292	10.0	2.0	230	250	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.6	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.293	13.3	2.0	2340	2100	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.6	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.294	16.7	2.0	1000	1320	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.6	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.301	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.4	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.302	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.4	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.303	13.3	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.4	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.304	16.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	54.4	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.311	6.7	2.0	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	87.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.312	10.0	2.0	20	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	87.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.313	13.3	2.0	1280	1390	70	1/20	6.7	11.3	10.0	87.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.314	16.7	2.0	260	510	70	1/20	6.7	11.3	10.0	87.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.321	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	86.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.322	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	86.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.323	13.3	1.5	70	130	70	1/20	6.7	11.3	10.0	86.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.324	16.7	1.5	100	100	70	1/20	6.7	11.3	10.0	86.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0
20.331	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.332	10.0	2.0	830	690	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.333	13.3	2.0	4400	4290	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.334	16.7	2.0	6330	6500	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.341	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.342	10.0	1.5	75	50	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.343	13.3	1.5	410	300	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.344	16.7	1.5	265	280	70	1/20	13.3	16.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	0.0	0.0
20.351	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	18.9	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.352	10.0	2.0	390	500	70	1/20	13.3	16.3	8.3	18.9	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.353	13.3	2.0	650	620	70	1/20	13.3	16.3	8.3	18.9	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.354	16.7	2.0	390	460	70	1/20	13.3	16.3	8.3	18.9	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.361	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	23.5	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.362	10.0	1.5	60	60	70	1/20	13.3	16.3	8.3	23.5	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.363	13.3	1.5	250	240	70	1/20	13.3	16.3	8.3	23.5	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.364	16.7	1.5	175	190	70	1/20	13.3	16.3	8.3	23.5	0.0	0.0	0.0	18.0	100.0	0.0	0.0
20.371	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	56.8	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.372	10.0	2.0	530	520	70	1/20	13.3	16.3	8.3	56.8	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.373	13.3	2.0	1720	1610	70	1/20	13.3	16.3	8.3	56.8	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.374	16.7	2.0	2000	1900	70	1/20	13.3	16.3	8.3	56.8	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.381	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	58.9	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.382	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	58.9	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.383	13.3	1.5	150	140	70	1/20	13.3	16.3	8.3	58.9	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.384	16.7	1.5	390	270	70	1/20	13.3	16.3	8.3	58.9	0.0	0.0	0.0	35.0	100.0	0.0	0.0
20.391	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	90.1	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.392	10.0	2.0	360	430	70	1/20	13.3	16.3	8.3	90.1	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.393	13.3	2.0	1310	1260	70	1/20	13.3	16.3	8.3	90.1	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.394	16.7	2.0	1980	1790	70	1/20	13.3	16.3	8.3	90.1	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.401	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	88.5	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.402	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	8.3	88.5	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.403	13.3	1.5	380	320	70	1/20	13.3	16.3	8.3	88.5	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.404	16.7	1.5	1780	1590	70	1/20	13.3	16.3	8.3	88.5	0.0	0.0	0.0	49.0	100.0	0.0	0.0
20.411	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.412	10.0	2.0	450	410	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.413	13.3	2.0	3690	3520	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.414	16.7	2.0	1510	1540	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.421	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.422	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.423	13.3	1.5	450	420	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.424	16.7	1.5	290	270	70	1/20	13.3	16.3	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	100.0	0.0	0.0
20.431	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.6	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.432	10.0	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.6	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.433	13.3	2.0	290	310	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.6	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.434	16.7	2.0	330	370	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.6	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0

EX No.	Ho (cm)	T (sec)	Q(2 times) (cc)		Wd (cm)	i	d (cm)	Hg (cm)	Hr (cm)	l' (cm)	BLK1 (	BLK2	BLK3	BLK4 unit	BLK5	BLK6	BLK7)
20.101	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.102	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.103	13.3	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.104	16.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
20.111	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.112	10.0	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.113	13.3	2.0	30	30	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.114	16.7	2.0	80	70	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.121	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.122	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.123	13.3	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.124	16.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.131	6.7	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.132	10.0	2.0	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.133	13.3	2.0	100	110	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.134	16.7	2.0	130	150	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.141	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.142	10.0	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.143	13.3	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.144	16.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	26.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0
20.151	6.7	2.0	140	160	70	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.152	10.0	2.0	310	450	70	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.153	13.3	2.0	1470	1420	70	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.154	16.7	2.0	700	600	70	1/20	0.0	7.0	6.7	60.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.161	6.7	1.5	0	0	70	1/20	0.0	7.0	6.7	59.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.162	10.0	1.5	20	10	70	1/20	0.0	7.0	6.7	59.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.163	13.3	1.5	120	100	70	1/20	0.0	7.0	6.7	59.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.164	16.7	1.5	190	180	70	1/20	0.0	7.0	6.7	59.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.0	0.0
20.171	6.7	2.0	510	540	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.172	10.0	2.0	430	510	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.173	13.3	2.0	1570	1850	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.174	16.7	2.0	980	810	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.181	6.7	1.5	200	200	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.182	10.0	1.5	30	30	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.183	13.3	1.5	15	15	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.184	16.7	1.5	20	20	70	1/20	6.7	11.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0
20.191	6.7	2.0	60	60	70	1/20	6.7	11.3	6.7	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.192	10.0	2.0	240	240	70	1/20	6.7	11.3	6.7	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.193	13.3	2.0	270	220	70	1/20	6.7	11.3	6.7	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.194	16.7	2.0	180	110	70	1/20	6.7	11.3	6.7	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.201	6.7	1.5	10	10	70	1/20	6.7	11.3	6.7	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.202	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.203	13.3	1.5	20	30	70	1/20	6.7	11.3	6.7	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.204	16.7	1.5	10	20	70	1/20	6.7	11.3	6.7	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.211	6.7	2.0	190	190	70	1/20	6.7	11.3	6.7	57.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.212	10.0	2.0	470	420	70	1/20	6.7	11.3	6.7	57.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.213	13.3	2.0	2060	1890	70	1/20	6.7	11.3	6.7	57.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.214	16.7	2.0	1620	2280	70	1/20	6.7	11.3	6.7	57.1	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.221	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	56.6	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.222	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	56.6	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.223	13.3	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	56.6	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.224	16.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	56.6	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0
20.231	6.7	2.0	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.8	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.232	10.0	2.0	70	70	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.8	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.233	13.3	2.0	1740	1780	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.8	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.234	16.7	2.0	1240	1420	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.8	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.241	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.2	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.242	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.2	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.243	13.3	1.5	690	840	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.2	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.244	16.7	1.5	410	310	70	1/20	6.7	11.3	6.7	90.2	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	0.0	0.0
20.251	6.7	2.0	450	560	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.252	10.0	2.0	250	140	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.253	13.3	2.0	1210	1220	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.254	16.7	2.0	480	460	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.261	6.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.262	10.0	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.263	13.3	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0
20.264	16.7	1.5	0	0	70	1/20	6.7	11.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0

EX No.	Ho (cm)	T (sec)	Q(2 times) (cc)		Wd (cm)	i	d (cm)	Hg (cm)	Hr (cm)	l' (cm)	BLK1 (	BLK2	BLK3	BLK4 unit	BLK5	BLK6	BLK7)
20.441	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.7	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.442	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.7	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.443	13.3	1.5	80	20	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.7	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.444	16.7	1.5	30	40	70	1/20	13.3	16.3	13.3	12.7	0.0	0.0	0.0	55.0	100.0	0.0	0.0
20.451	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	43.7	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.452	10.0	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	43.7	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.453	13.3	2.0	110	90	70	1/20	13.3	16.3	13.3	43.7	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.454	16.7	2.0	160	160	70	1/20	13.3	16.3	13.3	43.7	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.461	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	42.3	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.462	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	42.3	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.463	13.3	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	42.3	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.464	16.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	42.3	0.0	0.0	0.0	84.0	100.0	0.0	0.0
20.471	6.7	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.2	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.472	10.0	2.0	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.2	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.473	13.3	2.0	280	200	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.2	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.474	16.7	2.0	370	350	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.2	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.481	6.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.4	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.482	10.0	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.4	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.483	13.3	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.4	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
20.484	16.7	1.5	0	0	70	1/20	13.3	16.3	13.3	76.4	0.0	0.0	0.0	105.0	100.0	0.0	0.0
50.001	6.7	2.0	0	0	100	1/50	6.7	11.2	5.3	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
50.002	10.0	2.0	0	0	100	1/50	6.7	11.2	5.3	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
50.003	13.3	2.0	10	20	100	1/50	6.7	11.2	5.3	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
50.004	16.7	2.0	20	20	100	1/50	6.7	11.2	5.3	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
50.005	20.0	2.0	20	20	100	1/50	6.7	11.2	5.3	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
50.006	6.7	2.0	0	0	100	1/50	6.7	11.2	5.3	19.3	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0
50.007	10.0	2.0	0	0	100	1/50	6.7	11.2	5.3	19.3	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0
50.008	13.3	2.0	0	0	100	1/50	6.7	11.2	5.3	19.3	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0
50.009	16.7	2.0	10	20	100	1/50	6.7	11.2	5.3	19.3	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0
50.010	20.0	2.0	20	20	100	1/50	6.7	11.2	5.3	19.3	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0
50.011	6.7	2.0	0	10	100	1/50	6.7	11.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0
50.012	10.0	2.0	10	10	100	1/50	6.7	11.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0
50.013	13.3	2.0	20	20	100	1/50	6.7	11.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0
50.014	16.7	2.0	40	20	100	1/50	6.7	11.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0
50.015	20.0	2.0	80	60	100	1/50	6.7	11.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0
50.016	6.7	2.0	10	0	100	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0
50.017	10.0	2.0	10	10	100	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0
50.018	13.3	2.0	10	20	100	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0
50.019	16.7	2.0	20	30	100	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0
50.020	20.0	2.0	30	30	100	1/50	6.7	11.2	0.1	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0

水工研報告 3
1982 pp.143〜171

一般応力下での異方正規圧密粘性土の応力〜ひずみ関係

大槇　正紀*

目　次

1.　緒　論 …… 143
2.　解析に用いる基本的関係式 …… 144
　2.1　応力パラメーターと諸関係式 …… 144
　2.2　土の破壊基準と塑性ポテンシャル …… 145
　2.3　解析に用いる各種の応力状態 …… 148
3.　異方圧密粘性土の応力〜ひずみ関係の一般化 …… 150
　3.1　三軸圧縮下での応力〜ひずみ関係 …… 150
　3.2　応力〜ひずみ関係の一般化 …… 151
　3.3　まとめ …… 154
4.　応力〜ひずみ関係の計算結果 …… 155
　4.1　概　説 …… 155
　4.2　軸対称応力下での応力〜ひずみ関係 …… 156
　4.3　平均主応力一定応力下での応力〜ひずみ関係 …… 157
　4.4　一般応力下での応力〜ひずみ関係 …… 162
5.　結　論 …… 167
　参考文献 …… 168
　Summary …… 170

1.　緒　　論

漁港構造物の設計，施工，維持管理にとって，その基礎地盤の強度，変形特性を正確に把握することは重要である。現在，これらの構造物の基礎の設計は，その支持力（強度）と変形（沈下）に分けて行われている。前者はCoulomb の土圧理論や浅い基礎や杭にみられる支持力理論，または盛土に対する円弧すべりによる安定計算のように，土がその強度に達するといくらでもひずみが進行するという剛塑性体とみなした扱いがなされている。他方，基礎地盤の変形に対しては，主として，その鉛直方向の沈下を問題とするもので，従来より，Terzaghi の一次元圧密理論を中心とした扱いがなされてきた。従来より用いられてきたこれらの漁港構造物の基礎の標準設計法は，その扱いが比較的容易であり，また，現在に至るまで多くの実績を持つものであることなどにより，その実際的意義は非常に大きいと思われる。しかし，これらの方法には，上述したように，土の強度，変形特性に関する大きな仮定が含まれており，実際の土の挙動を十分に反映しているものとは言い難い。また，これらの設計法は，統一的なものではなく，個々の問題に対してそれぞれ異った取扱いをしている。

一方，このような漁港構造物の基礎を扱う土質力学または土質工学における最近の発展には，めざましいものがあり，土の物性としての強度と変形挙動を統一的に扱い得る段階に入ってきた。また，電子計算機の進歩と，有限要素法などに代表される数値計算法の進歩は，このような土の複雑な強度，変形特性を考慮に入れた地盤の挙動の解析を，かなりの精度で可能にするようになってきた。このような段階で，より実際の地盤に即した土の強度，変形特性を一般的に扱える関係式を導びくことは今後，各種の実際的な境界値問題を扱い，これを現場の問題に適用していく上で，意義あることと思われる。

実際の地盤は，一次元的に圧密された状態で堆積しており，一般に，鉛直方向土圧と水平方向土圧が異った，いわゆる，異方圧密の状態で存在している。このような地盤上に，構造物を局部的に築造するとき，この地盤は2次元または3次元的に，体積変化とともに，せん断変形（形状変形）を生じて，変形し，さらに，荷重が増加すると，破壊に至る。このときの地盤内の各点での応力状態は，場所毎に，また，荷重レベル毎に異なり，これにともなって，場所毎に異ったひずみが生じる。このような複雑な応力状態を生ずる地盤の変形及び破壊に関する挙動を精度よく解析するためには，これらの各状態に適応できる異方圧密土の応力〜ひずみ関係を確立する必要がある。

土のような粒状体から成る材料では，材料を構成する粒状体の形状やその初期の配列に起因する固有異方性（初期異方性）と，その土が受けた外力の変化によって生じる粒子配列の変化によって，後天的に生じる誘導異

---

* 水産土木工学部

方性（後発異方性）がある。このような土の異方性を考慮した応力～ひずみ関係式がいくつか提案されている。Calladine[12]は多数の塑性ポテンシャルを用いた，いわゆる，microstructural モデルを示し，土の異方性を表わそうとした。太田ら[2]，Pender[3]，関口ら[4]は，基準となる応力比などを与えて，現在の応力比とこの基準応力比との差の応力比と平均有効主応力をパラメーターとした異方圧密粘性土の応力～ひずみ関係式を示している。一方，Prevost[5]とMrozら[6]は塑性ポテンシャルがせん断とともに応力空間を移動すると仮定して異方性を表わす上の応力～ひずみ関係を示した。これらの応力～ひずみ関係はいずれも，せん断前に受けて来た応力経路履歴の影響をせん断時の応力～ひずみ関係に反映させるようにしたものであり，この意味で，これらのモデルは土の誘導異方性を扱ったものと言える。一方，龍岡[7]及び松岡ら[8]は固有異方性を持つ土の応力～ひずみ関係を示している。

本論文は，異方正規圧密粘性土の3次元的な一般応力下における応力～ひずみ関係を示したものである。本関係式は，著者[10,11]が種々の応力比で異方圧密した試料を用いて，三軸圧縮及び伸張下で種々の応力経路に沿って行った試験結果より得られた軸対称応力下での応力～ひずみ関係式を基礎にし，これをいくつかの仮定のもとに，一般化したものである。得られた応力～ひずみ関係式は弾塑性理論を基礎にしており，2つの塑性ポテンシャルを持つ非関連流動則の形となっており，上に述べた誘導異方性を有する応力～ひずみ関係式となっている。本論文の後半において，得られた土の応力～ひずみ関係式を用いて，3主応力下の種々の応力経路に沿ってせん断するときの応力～ひずみ関係の計算を行い，得られた関係式の妥当性を検討している。

2.　解析に用いる基本的関係式

2.1　応力パラメーターと諸係関式

2.1.1　応力パラメーター

いま，有効応力テンソルを σ_{ij} とし，その平均主応力及び偏差成分をそれぞれ，p 及び s_{ij} で表わす。すなわち，

$$p=\frac{1}{3}\sigma_{kk},\quad s_{ij}=\sigma_{ij}-p\ \delta_{ij} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに，δ_{ij} はクロネッカーのデルタであり，σ_{kk} のようにくり返された下添字に対しては総和規約を適用する。すなわち，

$$\sigma_{kk}\equiv\sum_{k=1}^{3}\sigma_{kk}=\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}$$

$$\sigma_{kl}\sigma_{kl}\equiv\sum_{k=1}^{3}\ \sum_{l=1}^{3}\sigma_{kl}\sigma_{kl}=\sigma_{11}{}^2+\sigma_{12}{}^2+\sigma_{13}{}^2+\sigma_{21}{}^2$$
$$+\sigma_{22}{}^2+\sigma_{23}{}^2+\sigma_{31}{}^2+\sigma_{32}{}^2+\sigma_{33}{}^2$$

$$\sigma_{kl}\sigma_{lm}\sigma_{mk}\equiv\sum_{k=1}^{3}\ \sum_{m=1}^{3}\ \sum_{l=1}^{3}\sigma_{kl}\ \sigma_{lm}\ \sigma_{mk}=\sigma_{11}{}^3$$
$$+\sigma_{11}\sigma_{12}\sigma_{21}+\sigma_{11}\sigma_{13}\sigma_{31}+\sigma_{12}\sigma_{21}\sigma_{11}+\sigma_{12}\sigma_{22}\sigma_{21}$$
$$+\sigma_{12}\sigma_{23}\sigma_{31}+\cdots\cdots$$
$$+\sigma_{33}\sigma_{31}\sigma_{13}+\sigma_{33}\sigma_{32}\sigma_{23}+\sigma_{33}{}^3$$

以下において扱う応力パラメーターはすべて有効応力に関するものとする。また，直交直線座標系で議論を行う。

このとき，解析において次に示す新しい応力パラメーターを導入する。

$$\left.\begin{aligned}\eta_{ij}&=\frac{s_{ij}}{p},\quad \eta=\sqrt{\frac{3}{2}\eta_{kl}\ \eta_{kl}}\\ \cos\ 3\theta&=\frac{\sqrt{6}\ \eta_{kl}\ \eta_{lm}\ \eta_{mk}}{(\eta_{kl}\ \eta_{kl})^{3/2}}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

この式において，η_{ij} は応力比を表わす偏差テンソル（$\eta_{kk}=0$）であり，θ は，有効主応力空間において，応力ベクトルと σ_1 軸の両者の π 面上への投影のなす角を示している（図1参照）。

いま，後に示す異方圧密終了時の応力状態（$\sigma_{ij}{}^0$）から計算される応力状態を（$\sigma_{ij}{}^i$），また，後に示すような塑性偏差ひずみ増分の圧密成分がゼロとなる応力状態を（$\sigma_{ij}{}^0$）とする。また，これらに対応した平均主応力，偏差応力などの応力パラメーターには，それぞれ上添字 i 及び0をつけるものとする。このとき，これらに対応して，次のような応力比に関する偏差テンソルを定義する。

$$\left.\begin{aligned}\zeta_{ij}&=\frac{s_{ij}}{p}-\frac{s_{ij}{}^i}{p^i}=\eta_{ij}-\eta_{ij}{}^i\\ \xi_{ij}&=\frac{s_{ij}}{p}-\frac{s_{ij}{}^0}{p^0}=\eta_{ij}-\eta_{ij}{}^0\ .\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

式（3）より，明きらかなように，ζ_{ij} 及び ξ_{ij} は偏差テンソル（$\zeta_{kk}=\xi_{kk}=0$）である。このとき，これらの応力比テンソルに対応した新しい応力パラメーターを式（2）中の η 及び $\cos 3\theta$ に対応させて次のように導入する。

$$\zeta=\sqrt{\frac{3}{2}\zeta_{kl}\ \zeta_{kl}}\ ,\quad \xi=\sqrt{\frac{3}{2}\xi_{kl}\ \xi_{kl}}\ \cdots\cdots (4)$$

$$\left.\begin{aligned}\cos\ 3\ \theta_{\zeta}&=\frac{\sqrt{6}\zeta_{kl}\ \zeta_{lm}\ \zeta_{mk}}{(\zeta_{kl}\zeta_{kl})^{3/2}},\\ \cos\ 3\ \theta_{\xi}&=\frac{\sqrt{6}\ \xi_{kl}\ \xi_{lm}\ \xi_{mk}}{(\xi_{kl}\ \xi_{kl})^{3/2}}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

式（3），（4）に示した応力力比テンソル ζ_{ij}，ξ_{ij} 及び応力比 ζ，ξ はそれぞれ $\eta_{ij}{}^i(=s_{ij}{}^i/p^i)$ 及び $\eta_{ij}{}^0(=s_{ij}{}^0/p^0)$ の応力状態を基準にしたものであり，関口，太田[4]により，最初に導入されたものである。

2.1.2　応力パラメーターの偏導関数

つぎに，ここに導入した各応力パラメーターの有効応

力成分σ_{ij}に関する偏導関数を求める。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial p}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{3}\delta_{ij},\quad \frac{\partial s_{ij}}{\partial\sigma_{kl}}=\delta_{ik}\ \delta_{jl}-\frac{1}{3}\delta_{ij}\ \delta_{kl}\\&\frac{\partial\eta_{ij}}{\partial\sigma_{kl}}=\frac{1}{p}\left\{\delta_{ik}\ \delta_{jl}-\frac{1}{3}(\eta_{ij}+\delta_{ij})\ \delta_{kl}\right\}\end{aligned}\right\}\text{(6)}$$

の関係を考慮すると，次式を得る。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\eta}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{6p\eta}(9\eta_{ij}-2\ \eta^2\delta_{ij})\\&\frac{\partial(\cos 3\theta)}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{9}{2p\eta^3}(3\tau_{ij}-\eta\cos 3\theta\ \eta_{ij})\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(7)$$

ここに，

$$\tau_{ij}=\eta_{ik}\ \eta_{kj}-\frac{1}{3}\eta_{kl}\ \eta_{kl}\ \delta_{ij}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

つぎに，ζ，ξのσ_{ij}に関する偏導関数を求める。式(3)で導入した基準応力状態$(\eta_{ij}{}^i)$及び$(\eta_{ij}{}^0)$が，いま，考えている応力状態σ_{ij}の関数としたときの，応力比パラメーターζ及びξのσ_{ij}に関する偏導関数は，次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\zeta}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{2p\zeta}\left(3\zeta_{ij}-\zeta_{kl}\ \eta_{kl}\ \delta_{ij}-3p\zeta_{kl}\frac{\partial\eta_{kl}{}^i}{\partial\sigma_{ij}}\right)\\&\frac{\partial\xi}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{2p\xi}\left(3\xi_{ij}-\xi_{kl}\ \eta_{kl}\delta_{ij}-3p\ \xi_{kl}\frac{\partial\eta_{kl}{}^0}{\partial\sigma_{ij}}\right)\end{aligned}\right\}\text{(9)}$$

同様に，$\cos 3\theta_\zeta$，$\cos 3\theta_\xi$のσ_{ij}に関する偏導関数は次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\cos 3\theta_\zeta)}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{9}{2p\zeta^3}\Big\{&(3\tau^\zeta{}_{ij}-\zeta\cos 3\theta_\zeta\ \zeta_{ij})\\&-\eta_{kl}\left(\zeta_{lm}\zeta_{mk}-\frac{1}{3}\zeta\cos 3\ \theta\cdot\zeta_{kl}\right)\delta_{ij}\\&-p(3\tau^\zeta{}_{kl}-\zeta\cos 3\theta_\zeta\cdot\zeta_{kl})\frac{\partial\eta_{kl}{}^i}{\partial\sigma_{ij}}\Big\}\cdots\cdots(10)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\cos 3\theta_\xi)}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{9}{2p\xi^3}\Big\{&(3\tau^\xi{}_{ij}-\xi\cos 3\theta_\xi\cdot\xi_{ij})\Big\}\\&-\eta_{kl}\left(\xi_{lm}\xi_{mk}-\frac{1}{3}\xi\cos 3\theta_\xi\cdot\xi_{kl}\right)\delta_{ij}\\&-p(3\tau^\xi{}_{kl}-\xi\cos 3\theta_\xi\cdot\xi_{kl})\ \frac{\partial\eta_{kl}{}^0}{\partial\sigma_{ij}}\Big\}\cdots\cdots(11)\end{aligned}$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}&\tau^\zeta{}_{ij}=\zeta_{ik}\ \zeta_{kj}-\frac{1}{3}\zeta_{kl}\ \zeta_{kl}\ \delta_{ij}\\&\tau^\xi{}_{ij}=\xi_{ik}\ \xi_{kj}-\frac{1}{3}\ \xi_{kl}\ \xi_{kl}\ \delta_{ij}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

ここで，後に示すように，塑性ポテンシャルの外向き法線ベクトルの勾配を計算する場合には，基準応力状態$(\eta_{ij}{}^i)$，$(\eta_{ij}{}^0)$は固定して考える。したがって，このときの各応力パラメーターζ，ξ，$\cos 3\theta_\zeta$，$\cos 3\theta_\xi$のσ_{ij}に関する偏導関数は，式(9)～(11)において，$\partial\eta_{kl}{}^i/\partial\sigma_{ij}=0$，$\partial\eta_{kl}{}^0/\partial\sigma_{ij}=0$としたものになる。

2.2　土の破壊基準と塑性ポテンシャル

2.2.2　土の破壊基準

松岡，中井[9]は，土の変形，強度特性を合理的に説明するものとして，空間滑動面の概念を示した。そして，この面上の応力比τ/σ'_Nが一定値に達したとき，土が破壊するとする土の破壊基準を提案している。この応力比τ/σ'_Nは次式により表わされる。

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_N'}\right)^2=\frac{I_1I_2-9I_3}{9I_3}\ =x^2\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

ここに，I_1，I_2，I_3は有効応力σ_{ij}の第1次，第2次，第3次不変量であり，次の関係がある。

$$\left.\begin{aligned}&I_1=3p\\&I_2=p^2\left(3-\frac{\eta^2}{3}\right)\\&I_3=p^3\left(\frac{2}{27}\eta^3\cos 3\ \theta-\frac{\eta^2}{3}+1\right)\end{aligned}\right\}\cdots(14)$$

式(14)を式(13)に代入して整理すると，次式を得る。

$$\begin{aligned}g(\eta,\ \cos 3\theta,\ x)=&-2(x^2+1)\ \eta^3\cos 3\ \theta\\&+3(3x^2+2)\ \eta^2-27x^2=0\cdots\cdots\cdots(15)\end{aligned}$$

破壊時の$(\eta,\ \cos 3\theta,\ x)$に対応する応力状態を$(M,\ \cos 3\theta_f,\ X)$で表わす。すなわち，$(M,\ \cos 3\theta_f,\ X)$は次の関係がある。

$$\begin{aligned}g_f(M,\ \cos 3\theta_f,\ X)&\equiv g(M,\ \cos 3\theta_f,\ X)\\&=-2(X^2+1)M^3\cos 3\theta_f+3(3X^2+2)M^2\\&\quad-27X^2=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)\end{aligned}$$

この破壊基準は図1に示すように，与えられたXに対し，3主応力空間において原点を通り，モール・クーロンの破壊基準に外接する錐面で表わされる。いま，三軸圧縮下での破壊時の土の内部摩擦角をϕ'_Cとすると，Xとϕ'_Cの間には次の関係がある。

$$X=\frac{2\sqrt{2}}{3}\tan\phi'_C\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

また，三軸圧縮下$(\sigma_2=\sigma_3)$及び三軸伸張下$(\sigma_1=\sigma_2)$でのMの値をそれぞれM_C及びM_Eとすると，次式が成立する。

$$X^2=\frac{2M_C^2}{(2M_C+3)(3-M_C)}=\frac{2M_E^2}{(3-2M_E)(3+M_E)}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

この式より，$0<M_C<3$，$0<M_E<3/2$である。

一方，式(16)において破壊時の空間滑動面上の応力比Xが与えられると，Mはθ_fの関数として，式(16)を解くことにより得られる。式(16)の根は次のように与えられる。

i)　$\cos 3\theta_f\neq 0$ $\left(\theta_f\neq\frac{2}{3}n\pi\pm\frac{\pi}{6}\right.$，$n$は整数$\left.\right)$のとき，

$$\left.\begin{aligned} M_1 &= C_1\frac{1+2\cos\Theta_f}{\cos 3\theta_f} \\ M_2 &= C_1\frac{1-\cos\Theta_f-\sqrt{3}\sin\Theta_f}{\cos 3\theta_f} \\ M_3 &= C_1\frac{1-\cos\Theta_f+\sqrt{3}\sin\Theta_f}{\cos 3\theta_f} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

ここに,

$$\left.\begin{aligned} &\cos\Theta_f = 1-C_2\cos^2 3\theta_f \\ &C_1=\frac{3X^2+2}{2(X^2+1)},\ C_2=\frac{54X^2(X^2+1)^2}{(3X^2+2)^3} \end{aligned}\right\} \cdots(20)$$

ii) $\cos 3\theta_f=0$ $(\theta_f=\frac{2}{3}n\pi\pm\frac{\pi}{6})$ のとき,

$$M=\pm 3\sqrt{\frac{X^2}{3X^2+2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

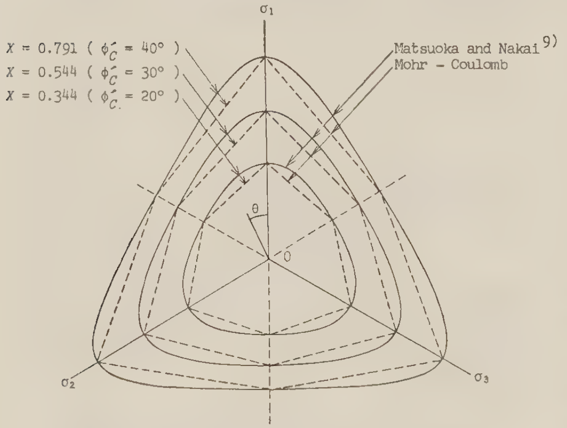

σ1
σ2
σ3
θ
0
X = 0.791 (ϕ'_C = 40°)
X = 0.544 (ϕ'_C = 30°)
X = 0.344 (ϕ'_C = 20°)
Matsuoka and Nakai 9)
Mohr - Coulomb

図 1 π面上での松岡, 中井9) の破壊基準
Failure criterion of soil by Matsuoka and Nakai9) on the π-plane

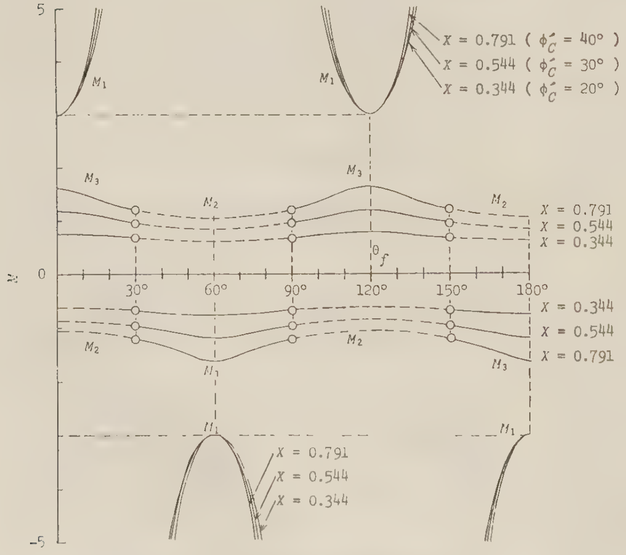


図 2 M と θ_f の関係の計算例
Calculated examples of relationship between M and θ_f

式(19), (21)により計算される M と θ_f の関係を $\phi_{1C}=$ 20°, 30°, 40°の場合について示すと図2のようになる。この図を参考にして, $0<M<3$を考慮すると, 破壊時のMは各 θ_f に対して次のように与えられる。

i) $\cos 3\theta_f>0\left(\frac{4n-1}{6}\pi<\theta_f<\frac{4n+1}{6}\pi\right)$のとき,

$$M=M_3=C_1\frac{1-\cos\Theta_f+\sqrt{3}\sin\Theta_f}{\cos 3\theta_f}\cdots\cdots\cdots(22)$$

ii) $\cos 3\theta_f<0\left(\frac{4n+1}{6}\pi<\theta_f<\frac{4n+3}{6}\pi\right)$のとき,

$$M=M_2=C_1\frac{1-\cos\Theta_f-\sqrt{3}\sin\Theta_f}{\cos 3\theta_f}\cdots\cdots\cdots(23)$$

iii) $\cos 3\theta_f=0\left(\theta_f=\frac{4n\pm1}{6}\pi\right)$のとき

$$M=3\sqrt{\frac{X^2}{3X^2+2}}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

2.2.2 塑性ポテンシャルと法線ベクトル

つぎに, 土が破壊する前の応力状態について考える。このときの空間滑動面上の応力比 x と $(\eta, \cos 3\theta)$ との関係は式(15)で表わされる。式(15)において xを一定とすると, 3有効主応力空間において, この曲面と p 一定平面との交線の π 面上への投影が図1で示されるような原点を通る錐面で表わされる。また, x が与えられたとき与えられた θ に対する η の値は, 式(22)～(24)において $(X, \cos 3\theta_f)$ のかわりに, $(x, \cos 3\theta)$ を代入したときのMの値として求めることができる。任意の x での $g(\eta, \cos 3\theta, x)$ の有効応力 σ_{ij} に関する偏導関数は, 次のように表わされる。

$$\frac{\partial g(\eta,\theta,x)}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{\partial g}{\partial\eta}\ \frac{\partial\eta}{\partial\sigma_{ij}} + \frac{\partial g}{\partial(\cos 3\theta)}\cdot\frac{\partial(\cos 3\theta)}{\partial\sigma_{ij}}\cdots\cdots\cdots(25)$$

ここで, 式(15)より次式を得る。

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial\eta} &= -6\eta\left\{(x^2+1)\,\eta\cos 3\theta-(3x^2+2)\right\} \\ \frac{\partial g}{\partial(\cos 3\theta)} &= -2(x^2+1)\eta^3 \end{aligned}\right\}(26)$$

式(7), (26)を式(25)に代入すると, $\partial g/\partial\sigma_{ij}$ は次のように表わされる。

$$\frac{\partial g}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{p}(\Phi_0\delta_{ij}+\Phi_1\eta_{ij}+\Phi_2\tau_{ij})\cdots(27)$$

ここに,

$$\left.\begin{aligned} \Phi_0 &= 2\eta^2\{(x^2+1)\eta\cos 3\theta-(3x^2+2)\} \\ \Phi_1 &= 9(3x^2+2) \\ \Phi_2 &= -27(x^2+1) \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

ここに，τ_{ij} は式(８)で計算される。$\partial g/\partial\sigma_{ij}$ は２階のテンソルであるが，この偏差成分を ν_{ij} で表わす。このとき，ν_{ij} は式(27)より次のように表わされる。

$$\nu_{ij}=\frac{\partial g}{\partial o_{ij}}-\frac{1}{3}\ \frac{\partial g}{\partial\sigma_{kk}}\delta_{ij}=\frac{1}{p}(\Phi_1\eta_{ij}+\Phi_2\tau_{ij})\quad\cdots\cdots(29)$$

つぎに，式(３)，(４)で定義された応力比テンソル ζ_{ij} 及び ξ_{ij} に関する応力パラメーターについて関係式を求める。以後の議論では簡単のため，ζ_{ij} 及び ξ_{ij} を一括して μ_{ij} で表わし，これを用いて諸関係式を求める。式において，x, cos 3θ の代わりに，式(４)，(５)で定義される μ, cos $3\theta\mu$ ($\mu\equiv\zeta$ 又は ξ) を代入したときの x を x_μ で表わし，このときの g を g_μ で表わす。すなわち，

$$\begin{aligned}g_\mu(\mu,\ \cos\ \theta_\mu,\ x_\mu)&\equiv g(\mu,\ \cos\ 3\theta_\mu,\ x_\mu)\\&=-2(x_\mu{}^2+1)\mu^3\cos 3\,\theta_\mu+3\,(3x_\mu{}^2+2)\,\mu^2\\&\quad-27x_\mu{}^2=0\quad\cdots\cdots(30)\end{aligned}$$

$$(\mu\equiv\zeta\ \text{又は}\ \xi)$$

ここで，後の計算において，$g_\mu=0$ は塑性ポテンシャルと考えているので，この塑性ポテンシャル曲面の外向き法線ベクトルの成分として，$g_\mu=0$ の σ_{ij} に関する偏導関数を求める際には，x, $\eta_{ij}{}^i$ 及び $\eta_{ij}{}^0$ は一定として偏微分を行う。$\partial g/\partial\sigma_{ij}$ は次のように書ける。

$$\frac{\partial g_\mu}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{\partial g_\mu}{\partial\mu}\ \frac{\partial\mu}{\partial\sigma_{ij}}+\frac{\partial g_\mu}{\partial(\cos\ 3\theta_\mu)}\ \frac{\partial(\cos\ 3\theta_\mu)}{\partial\sigma_{ij}}\cdots(31)$$

ここで，$\partial g_\mu/\partial\mu$ 及び $\partial g_\mu/\partial(\cos 3\theta_\mu)$ は，式(26)において，x, η, cos 3θ の代わりに x_μ, μ, cos $3\theta_\mu$ を代入することにより得られる。また，$\partial\mu/\partial\sigma_{ij}$, $\partial(\cos\ 3\theta_\mu)/\partial\sigma_{ij}$ は，式(９)～(11)において，$\partial\eta_{ij}{}^i/\partial\sigma_{ij}=0$ 及び $\partial\eta_{ij}{}^0/\partial\sigma_{ij}=0$ とすることにより得られる。したがって，これらを式(31)に代入すると，$\partial g_\mu/\partial\sigma_{ij}$ は次のように書ける。

$$\frac{\partial g_\mu}{\partial\sigma_{ij}}=\frac{1}{p}(\Phi_0{}^\mu\ \delta_{ij}+\Phi_1{}^\mu\ \mu_{ij}+\Phi_2{}^\mu\ \tau^\mu{}_{ij})\ \cdots(32)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}&\Phi^\mu{}_0=3\{3(x_\mu{}^2+1)\mu_{lm}\mu_{mk}-(3x_\mu{}^2+2)\mu_{kl}\}\eta_{kl}\\&\Phi^\mu{}_1=9(3x_\mu{}^2+2)\\&\Phi^\mu{}_2=-27(x_\mu{}^2+1)\end{aligned}\right\}(33)$$

ただし，μ は ζ または ξ を取る。また，μ_{ij}, $\tau^\mu{}_{ij}$ ($\mu=\zeta$ 又は ξ) は式(３)及び式(12)で計算される。いま２階のテンソル $\partial g_\mu/\partial\sigma_{ij}$ の偏差成分を $\nu^\mu{}_{ij}$ ($\mu=\zeta$ 又は ξ) とすると，これは次のように表わされる。

$$\nu_{ij}{}^\mu=\frac{1}{p}(\Phi^\mu{}_1\ \mu_{ij}+\Phi^\mu{}_2\ \tau_{ij}{}^\mu)\ \ (\mu=\zeta\ \text{または}\ \xi)\quad\cdots\cdots(34)$$

$\eta_{ij}{}^i=0$ または $\eta_{ij}{}^0=0$ のとき（等方圧密の場合），$\mu_{ij}=\eta_{ij}$ となり，式(33)，(34)はそれぞれ式(28)，(29)に一致する。

式(29)，(34)により表わされる偏差テンソル ν_{ij}, $\nu_{ij}{}^\mu$ ($\mu\equiv\zeta$ 又は ξ) は，それぞれ有効応力空間 (σ_{ij}) において，曲面 $g(\eta,\cos\ 3\theta,x)=0$ 及び g_μ (μ, $\cos3\theta_\mu$, x_μ) ＝０の外方向法線ベクトルの偏差成分を与えている。ここで，これらの偏差テルソルを正規化したテンソル N_{ij}, $N^\mu{}_{ij}$ を次のように与える。

$$N_{ij}=\frac{\nu_{ij}}{(\nu_{kl}\ \nu_{kl})^{1/2}},\ N_{ij}{}^\mu=\frac{\nu_{ij}{}^\mu}{(\nu_{kl}{}^\mu\ \nu_{kl}{}^\mu)^{1/2}}\cdots\cdots(35)$$

$$(\mu=\zeta\ \text{又は}\ \xi)$$

上式より，$N_{kk}=N_{kk}{}^\mu=0$,　$N_{kl}\ \ N_{kl}=N_{kl}{}^\mu\ \ N_{kl}{}^\mu=1$ である。後に示すように，$g=0$ 及び $g_\mu=0$ ($\mu\equiv\zeta$ 又は ξ) を偏差ひずみ増分の塑性ポテンシャルとして用いる。

2.2.3　応力パラメーター x 及び x_ζ の増分

つぎに，式(15)で表わされる応力パラメーター x の増分について考える。これは次のように表わされる。

$$dx=\left(\frac{\partial x}{\partial\eta}\ \frac{\partial\eta}{\partial\sigma_{kl}}+\frac{\partial x}{\partial(\cos 3\theta)}\ \frac{\partial(\cos 3\theta)}{\partial\sigma_{kl}}\right)d\sigma_{kl}\cdots(36)$$

ここで，式(15)より，次式を得る。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial x}{\partial\eta}=\frac{3x\{(3x^2+2)-(x^2+1)\eta\ \cos\ 3\theta\}}{2\eta(3-\eta\cos\ 3\theta)}\\&\frac{\partial x}{\partial(\cos 3\theta)}=-\frac{x(x^2+1)\eta}{2(3-\eta\ \cos\ 3\theta)}\end{aligned}\right\}\cdots(37)$$

いま，式(７)及び式(37)を式(36)に代入すると，dx は次のように表わされる。

$$\begin{aligned}dx&=\frac{x(\Phi_0\delta_{kl}+\Phi_1\eta_{kl}+\Phi_2\tau_{kl})}{4p\eta^2(3-\eta\ \cos\ 3\,\theta)}d\sigma_{kl}\\&=L_{kl}\ d\sigma_{kl}\quad\cdots\cdots(38)\end{aligned}$$

ここに，

$$L_{kl}=\frac{x(\Phi_0\delta_{kl}+\Phi_1\ \eta_{kl}+\Phi_2\tau_{kl})}{4p\eta^2(3-\eta\ \cos\ 3\theta)}\quad\cdots\cdots(39)$$

式中，Φ_0, Φ_1, Φ_2 は式(28)で与えられる。

つぎに，式(30)で定義された応力パラメーター x_ζ の増分を考える。これは次のように表わされる。

$$dx_\zeta=\left\{\frac{\partial x_\zeta}{\partial\zeta}\ \frac{\partial\zeta}{\partial\sigma_{kl}}+\frac{\partial x_\zeta}{\partial(\cos 3\,\theta_\zeta)}\ \frac{\partial(\cos 3\,\theta_\zeta)}{\partial\sigma_{kl}}\right\}d\sigma_{kl}\quad\cdots\cdots(40)$$

ここで，$\partial x_\zeta/\partial\zeta$, $\partial x_\zeta/\partial(\cos\ 3\theta_\zeta)$ は，式(37)において，η, cos 3θ, x の代わりに ζ, cos $3\theta_\zeta$, x_ζ を代入することにより得られる。また，塑性ポテンシャルの中心の応力状態 ($\eta_{ij}{}^i$) は，応力状態 (σ_{ij}) の変化とともに変化すると考える。すなわち，$\partial\zeta/\partial\sigma_{kl}$, $\partial(\cos\ 3\theta_\zeta)/\partial\sigma_{kl}$ として，式(９)，(10)を用いる。このとき，式(40)はこれらの関係を用いて，次のように表わされる。

$$\begin{aligned}dx_\zeta&=\frac{x_\zeta}{4p\zeta^2\ (3-\zeta\ \cos 3\theta_\zeta)}(\Phi_0{}^\zeta\ \delta_{kl}+\Phi_1{}^\zeta\ \zeta_{kl}\\&\quad+\Phi_2{}^\zeta\tau_{kl}{}^\zeta+H_{kl})d\sigma_{kl}\\&=L_{kl}{}^\zeta\ d\sigma_{kl}\quad\cdots\cdots(41)\end{aligned}$$

ここに，

$$L_{ij}{}^{\zeta}=\frac{x_{\zeta}}{4p\zeta^2(3-\zeta\cos 3\theta_{\zeta})}(\Phi_0{}^{\zeta}\ \delta_{ij}+\Phi_1{}^{\zeta}\zeta_{ij}+\Phi_2{}^{\zeta}\ \tau_{ij}{}^{\zeta}+H_{ij})\cdots\cdots(42)$$

式中の $\Phi_0{}^{\zeta}$, $\Phi_1{}^{\zeta}$, $\Phi_2{}^{\zeta}$ は式(33)より表わされる。一方，H_{ij} は $\eta_{ij}{}^i$ が σ_{ij} の関数として，応力状態の変化とともに変化することにより得られるもので，式(9)，(10)などより次のように表わされる。

$$H_{ij}=-p(\Phi_1{}^{\zeta}\ \zeta_{kl}+\Phi_2{}^{\zeta}\tau_{kl}{}^{\zeta})\ \frac{\partial\eta_{kl}{}^i}{\partial\sigma_{ij}}\cdots\cdots(43)$$

2.3　解析に用いる各種の応力状態

2.3.1　同じ cos 3θ を有する2つの応力状態

ここでは，以後の解析に用いるいくつかの応力状態について考察する。はじめに，2つの応力状態(σ_{ij}),$(\bar{\sigma}_{ij})$を考える。それぞれに対応する応力比テンソルを η_{ij} 及び$\bar{\eta}_{ij}$，また，これらに対応する応力パラメーターを $(\eta, \cos 3\theta)$, $(\bar{\eta}, \cos 3\bar{\theta})$とする。いま，次式が成立する場合を考える。

$$\bar{\eta}_{ij}=k\ \eta_{ij}\qquad (k\geqq 0)\cdots\cdots(44)$$

このとき，式(2)より，次式が成立する。

$$\cos 3\bar{\theta}=\cos 3\theta\cdots\cdots(45)$$

すなわち，

$$\bar{\theta}=\pm\left(\frac{2}{3}n\pi-\theta\right)\qquad (n=0,\ 1,\ 2,\cdots\cdots)\cdots\cdots(46)$$

したがって，ある応力状態 (η_{ij}) に対する $(\bar{\eta}_{ij})$ の応力状態は π 面上では図3(a)のようになり，対応する6個の応力状態が考えられる。このとき，応力比 $\bar{\eta}$ と η の間には次の関係がある。

$$\bar{\eta}=\sqrt{\frac{3}{2}\bar{\eta}_{kl}\ \bar{\eta}_{kl}}=k\sqrt{\frac{3}{2}\eta_{kl}\ \eta_{kl}}=k\eta\cdots\cdots(47)$$

また，(σ_{ij})，$(\bar{\sigma}_{ij})$ の平均有効主応力をそれぞれ p，$\bar{p}$とすると，次式が成立する。

$$\bar{\sigma}_{ij}=k\frac{\bar{p}}{p}(\sigma_{ij}-p\delta_{ij})+\bar{p}\delta_{ij}\cdots\cdots(48)$$

特に，両応力状態の平均主応力が等しいとき $(p=\bar{p})$，上式は次のように書ける。

$$\bar{\sigma}_{ij}=k\cdot\sigma_{ij}-p(k-1)\delta_{ij}=p(k\cdot\eta_{ij}+\delta_{ij})\cdots(49)$$

つぎに，応力状態$(\sigma_{ij}{}^i)$を基準とした応力状態を$(\sigma_{ij}{}^{\zeta})$で表わすと，これは式(3)より次のように表わされる。

$$\sigma^{\zeta}{}_{ij}=p\left(\frac{s_{ij}}{p}-\frac{s_{ij}{}^i}{p^i}\right)+p\delta_{ij}=p(\zeta_{ij}+\delta_{ij})\cdots\cdots(50)$$

この応力状態$(\sigma_{ij}{}^{\zeta})$と同じ $\cos 3\theta_{\zeta}$ を持ち，かつ，平均主応力の等しい応力状態 $(\bar{\sigma}_{ij}{}^{\zeta})$ は式(44)，(47)及び式(49)と同様にして，次のように求まる。

$$\bar{\zeta}_{ij}=k\ \zeta_{ij},\ \bar{\sigma}_{ij}{}^{\zeta}=p(k\cdot\zeta_{ij}+\delta_{ij}),\ \bar{\zeta}=k\zeta\ (k>0)\cdots\cdots(51)$$

$\eta_{ij}{}^0$を中心とする応力状態 $(\sigma_{ij}{}^{\xi})$ についても，式(50)，(51)と同様の関係式が導びけることは明らかである。

2.3.2　破壊包絡面上の応力状態

ここでは，式(51)で定義される応力状態 $(\bar{\zeta}_{ij})$ のうちで破壊基準式(16)を満足する応力状態$(\zeta_{ij}{}^f)$を求める。式(51)において，$(\zeta_{ij}{}^f)$ に対応するkを k_{ζ} で表わす。すなわち，

$$\zeta_{ij}{}^f=k_{\zeta}\ \zeta_{ij}\ (k_{\zeta}\geqq 1)\cdots\cdots(52)$$

式(3)の関係を用いると，上式は次のようになる（図3(b)参照)。

$$(\eta_{ij}{}^f)_{\zeta}=k_{\zeta}\cdot\zeta_{ij}+\eta_{ij}{}^i\cdots\cdots(53)$$

ここで，簡単に $(\eta_{ij}{}^f)_{\zeta}$ を $(\eta_{ij}{}^f)$ で表わすと，式(2)より，次の関係が成立する。

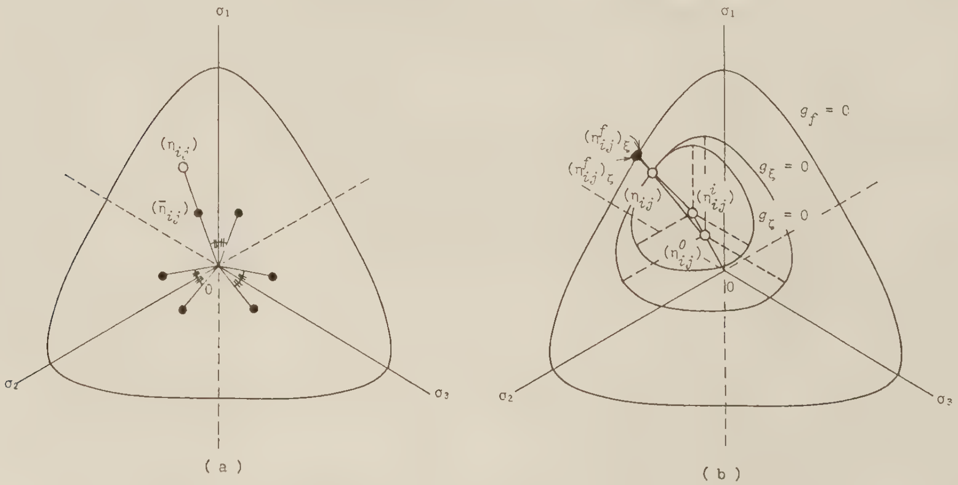


図 3　π 面上での応力状態 (a) $\bar{\eta}_{ij}=k\ \eta_{ij}$, (b) $(\eta_{ij}{}^f)_{\zeta}$, $(\eta_{ij}{}^f)_{\xi}$ の定義

Stress state on the π-plane (a) $\bar{\eta}_{ij}=k\ \eta_{ij}$, (b) Definition of $(\eta_{ij}{}^f)_{\zeta}$ and $(\eta_{ij}{}^f)_{\xi}$

$$\left.\begin{aligned}&M=\sqrt{\frac{3}{2}\eta_{kl}{}^f\ \eta_{kl}{}^f},\ \cos 3\theta_f=\frac{\sqrt{6}\,\eta_{kl}{}^f\ \eta_{lm}{}^f\eta_{mk}{}^f}{(\eta_{kl}{}^f\ \eta_{kl}{}^f)}\\&M^3\ \cos 3\theta_f=\frac{9}{2}\eta_{kl}{}^f\ \eta_{lm}{}^f\ \eta_{mk}{}^f\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(54)$$

式(54)を考慮して，式(53)を破壊条件式に代入すると次式を得る。

$$f(k_\zeta)=\alpha_1 k_\zeta{}^3+\alpha_2 k_\zeta{}^2+\alpha_3 k_\zeta+\alpha_4=0 \quad \cdots\cdots(55)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}\alpha_1&=2(X^2+1)\zeta_{kl}\ \zeta_{lm}\ \zeta_{mk}\\\alpha_2&=6(X^2+1)\zeta_{kl}\ \zeta_{lm}\ \eta_{mk}{}^i\\&\quad-(3X^2+2)\zeta_{kl}\ \zeta_{kl}\\\alpha_3&=6(X^2+1)\zeta_{kl}\ \eta_{lm}{}^i\ \eta_{mk}{}^i\\&\quad-2(3X^2+2)\zeta_{kl}\ \eta_{kl}{}^i\\\alpha_4&=2(X^2+1)\eta_{kl}{}^i\eta_{lm}{}^i\eta_{mk}{}^i\\&\quad-(3X^2+2)\eta_{kl}{}^i\ \eta_{kl}{}^i+6X^2\end{aligned}\right\}(56)$$

式(56)より分かるように，3次方程式(55)の係数α_1～α_4は，基準応力状態（$\eta_{ij}{}^i$）と現在の応力状態（η_{ij}）より計算される。したがって，（η_{ij}）及び（$\eta_{ij}{}^i$）が与えられることにより，式(55)を解いて3根は次のように求まる。

i) $\alpha_1 \neq 0$ のとき，（$\cos\ 3\theta_\zeta \neq 0$ のとき）

$$\left.\begin{aligned}k_{\zeta 1}&=2A_1\ \cos\ \Theta_\zeta-A_2\\k_{\zeta 2}&=-A_1(\cos\ \Theta_\zeta+\sqrt{3}\ \sin\ \Theta_\zeta)-A_2\\k_{\zeta 3}&=-A_1(\cos\ \Theta_\zeta-\sqrt{3}\ \sin\ \Theta_\zeta)-A_2\end{aligned}\right\}\cdots(57)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}&A_1=\frac{\sqrt{\alpha_2{}^2-3\alpha_1\alpha_3}}{3\alpha_1},\ A_2=\frac{\alpha_2}{3\alpha_1}\\&\cos\ 3\ \Theta_\zeta=-\frac{2\alpha_2{}^3-9\alpha_1\alpha_2\alpha_3+27\alpha_1{}^2\alpha_4}{2(\alpha_2{}^2-3\alpha_1\alpha_3)^{3/2}}\end{aligned}\right\}\cdots(58)$$

ii) $\alpha_1=0$ ($\cos\ 3\theta_\zeta=0$) のとき，

$$k_\zeta=\frac{-\alpha_3\pm\sqrt{\alpha_3{}^2-4\alpha_2\alpha_4}}{2\alpha_2} \quad \cdots\cdots(59)$$

このうち，必要な解は破壊時のMを求める場合（式(22)～(24)）と同様に考えて次のようになる。

i) $\alpha_1>0$ ($\cos\ 3\theta_\zeta>0$) のとき，

$$k_\zeta=k_{\zeta 3}=-A_1(\cos\ \Theta_\zeta-\sqrt{3}\ \sin\ \Theta_\zeta)-A_2\cdots(60)$$

ii) $\alpha_1<0$ ($\cos\ 3\theta_\zeta<0$) のとき，

$$k_\zeta=k_{\zeta 2}=-A_1(\cos\ \Theta_\zeta+\sqrt{3}\sin\ \Theta_\zeta)-A_2\cdots(61)$$

iii) $\alpha_1=0$ ($\cos\ 3\theta_\zeta=0$) のとき，

$$k_\zeta=-\frac{\alpha_3+\sqrt{\alpha_3{}^2-4\alpha_2\alpha_4}}{2\alpha_2} \quad \cdots\cdots(62)$$

つぎに，三軸圧縮条件下のみに限定して，式(55)を考える。このとき，

$$\left.\begin{aligned}&\eta_{11}=\frac{2}{3}\eta,\ \eta_{22}=\eta_{33}=-\frac{1}{3}\eta,\ \eta=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{p}\\&\alpha_1=2(X^2+1)(\eta-\eta_{Ci})^3\\&\alpha_2=\{6(X^2+1)\eta_{Ci}-3(3X^2+2)\}(\eta-\eta_{Ci})^2\\&\alpha_3=\{6(X^2+1)\eta_{Ci}-6(3X^2+2)\}\eta_{Ci}\\&\quad\cdot(\eta-\eta_{Ci})\\&\alpha_4=2(X^2+1)\eta_{Ci}{}^3-3(3X^2+2)\eta_{Ci}{}^2+27X^2\end{aligned}\right\}(63)$$

これらを式(55)に代入して整理すると，

$$\begin{aligned}&2(X^2+1)\{k_\zeta(\eta-\eta_{Ci})+\eta_{Ci}\}^3-3(3X^2+2)\\&\quad\cdot\{k_\zeta(\eta-\eta_{Ci})+\eta_{Ci}\}^2+27X^2=0\end{aligned} \quad \cdots\cdots(64)$$

いま，

$$M_C=k_\zeta(\eta-\eta_{Ci})+\eta_{Ci} \quad \cdots\cdots(65)$$

とおくと，式(64)は破壊条件式(16)の $\cos\ 3\theta_f=1$($\theta_f=\frac{2}{3}n\pi$)の場合，すなわち，三軸圧縮下の場合に一致する。式(65)，(60)より，k_ζは次のように書ける。

$$k_\zeta=\frac{M_C-\eta_{Ci}}{\eta_C-\eta_{Ci}} \quad \cdots\cdots(66)$$

以上において，応力状態（$\sigma_{ij}{}^i$）を基準にしたときの各種の応力状態を求めてきた。次に有効応力状態（$\sigma_{ij}{}^0$）を基準にしたときの各種の応力状態についても同様の議論ができる。このとき，式(52)，(53)に対応する応力状態は次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}&\xi_{ij}{}^f=k_\xi\cdot\xi_{ij}\\&(\eta_{ij}{}^f)_\xi=k_\xi\cdot\xi_{ij}+\eta_{ij}{}^0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(67)$$

ここに，k_ξは次の3次方程式を満足する$\eta_{ij}{}^0$，η_{ij}より計算される係数である。

$$\beta_1 k_\xi{}^3+\beta_2 k_\xi{}^2+\beta_3 k_\xi+\beta_4=0 \quad \cdots\cdots(68)$$

ただし，β_1～β_4は式(56)において，ζ_{ij}，$\eta_{ij}{}^i$をξ_{ij}，$\eta_{ij}{}^0$で置きかえたものである。解析に必要なk_ξは，式(60)～(62)の場合と同様に次のように求められる。

$$\left.\begin{aligned}&\text{i)}\ \ \beta_1>0\ (\cos\ 3\theta_\xi>0)\ \text{のとき，}\\&\qquad k_\xi=-B_1(\cos\ \Theta_\xi-\sqrt{3}\ \sin\Theta_\xi)-B_2\\&\text{ii)}\ \ \beta_1<0\ (\cos\ 3\theta_\xi<0)\ \text{のとき，}\\&\qquad k_\xi=-B_1(\cos\ \Theta_\xi+\sqrt{3}\ \sin\ \Theta_\xi)-B_2\\&\text{iii)}\ \ \beta_1=0\ (\cos\ 3\theta_\xi=0)\ \text{のとき，}\\&\qquad k_\xi=-\frac{\beta_3+\sqrt{\beta_3{}^2-4\beta_2\ \beta_4}}{2\beta_2}\end{aligned}\right\}\cdots(69)$$

ここに，

$$\left.\begin{aligned}&B_1=\frac{\sqrt{\beta_2{}^2-3\beta_1\ \beta_3}}{3\beta_1},\ B_2=\frac{\beta_2}{3\beta_1}\\&\cos\ 3\ \Theta_\xi=-\frac{2\beta_2{}^3-9\beta_1\beta_2\beta_3+27\beta_1{}^2\beta_4}{2(\beta_2{}^2-3\beta_1\beta_3)^{3/2}}\end{aligned}\right\}(70)$$

最後に，$\mu_{ij}{}^f$ ($\mu=\zeta$ 又は ξ) に対応するMをM_μとすると，これは式(54)の第1式と同様にして，次のように表わされる。

$$M_{\mu}=\sqrt{\frac{3}{2}\mu_{kl}{}^{f}\ \mu_{kl}{}^{f}}\quad(\mu\equiv\zeta \text{ 又は } \xi)\cdots\cdots\cdots(71)$$

2.3.3　せん断中の $(\eta_{ij}{}^{i})$，$(\eta_{ij}{}^{0})$ の移動に関する仮定

本文においては，一般応力下での土の応力～ひずみ関係を弾塑性理論に基づいて求めるが，この際，用いる塑性ポテンシャルとして，式(30)で示されるものを用いる。これは，$(\eta_{ij}{}^{i})$ または $(\eta_{ij}{}^{0})$ を中心軸とし，原点にその頂点を持つ錐面で表わされる。ここで，この塑性ポテンシャル曲面は，せん断の進行とともに，中心軸 $(\eta_{ij}{}^{i})$ または，$(\eta_{ij}{}^{0})$ を中心として拡大していくと同時に，この中心軸も静水圧軸に向かって移動すると仮定する。せん断の進行とともに，塑性ポテンシャルの中心軸が静水圧軸方向に移動することの物理的意味としては，次のように考えることができる。すなわち，異方圧密終了時においては，供試体は今まで受けてきた異方圧密の応力履歴による異方性をもっており，塑性ポテンシャル $g_{\mu}=0$ の中心 $(\eta_{ij}{}^{i})$ 又は $(\eta_{ij}{}^{0})$ は等方応力状態と異った，より異方圧密時の応力状態に近い状態にあると考えることができる。しかし，せん断の進行とともに，せん断による土粒子間の再配列及び練り返しにより，この誘導異方性の記憶は次第に失なわれ，等方応力状態からせん断した試料との差異が少なくなる。したがって，塑性ポテンシャルも次第に等方的な塑性ポテンシャル，すなわち，中心を等方応力状態に持つものに近づいていくと考えることができる。以上の考えにより，塑性偏差ひずみ増分のせん断成分の塑性ポテンシャル $g_{\zeta}=0$ の中心 $(\eta_{ij}{}^{i})$ は，異方圧密が終ったせん断開始時には，そのときの応力状態 $(\eta_{ij}{}^{i0})$ に等しく，せん断の進行とともに，同じ偏角をもって静水圧軸方向に移動すると仮定する（図3(b)参照)。このとき，式(44)に示した関係を用いて，$\eta_{ij}{}^{i}$ 及び η^{i} は次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}\eta_{ij}{}^{i}&=k_i\ \eta_{ij}{}^{i0}\\ \eta^{i}&=k_i\ \eta^{i0}\end{aligned}\right\}\quad(1\geqq k_1\geqq 0)$$

ここに，k_i はせん断の進行とともに変化するスカラー量で，異方圧密終了時に $k_i=1(\eta_{ij}{}^{i}=\eta_{ij}{}^{i0})$ である。いま，図4に示したように，η^{i} は異方圧密終了直後のせん断開始時 $(x_{\zeta}=0)$ に η^{i0} に等しく，破壊時 $(x_{\zeta}=X)$ に，$\eta^{i}=0$ とする。またせん断中は図4に示したように，$x_{\zeta}\sim\eta^{i}$ 関係は直線で表わされると仮定する。このとき，次式が成立する。

$$\left.\begin{aligned}\eta^{i}&=\eta^{i0}\left(1-\frac{x_{\zeta}}{X}\right)\\ \eta_{kl}{}^{i}&=\eta_{kl}{}^{i0}\left(1-\frac{x_{\zeta}}{X}\right)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(72)$$

上式の第2式を σ_{ij} で偏微分することにより，次式を得る。

$$\frac{\partial\eta_{kl}{}^{i}}{\partial\sigma_{ij}}=-\frac{\eta_{kl}{}^{i0}}{X}\ \frac{\partial x_{\zeta}}{\partial\sigma_{ij}}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(73)$$

上式を式(42)に代入して，整理することにより，次式を得る。

$$L_{ij}{}^{\zeta}=\frac{\partial x_{\zeta}}{\partial\sigma_{ij}}=-\frac{1}{L}(\varPhi_0{}^{\zeta}\ \delta_{ij}+\varPhi_1{}^{\zeta}\zeta_{ij}+\varPhi_2{}^{\zeta}\ \tau_{ij}{}^{\zeta})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(74)$$

ここに，

$$L=p\left\{\frac{4\zeta^2}{x_{\zeta}}(3-\zeta\ \cos 3\,\theta_{\zeta})-\frac{1}{X}(\varPhi_1{}^{\zeta}\ \zeta_{kl}+\varPhi_2{}^{\zeta}\tau_{kl}{}^{\zeta})\eta_{kl}{}^{i0}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(75)$$

3.　異方圧密粘性土の応力～ひずみ関係の一般化

3.1　三軸圧縮下での応力～ひずみ関係

著者[10,11]は，練り返し再圧密試料について，種々の応力比を用いた異方圧密（応力比一定圧密）試験及び異方圧密した後の任意応力経路に沿う圧密，せん断試験を行った。また，これらの試験結果をもとに，軸対称条件下での応力～ひずみ関係を示した。これらは三軸圧縮下では次のように与えられる。ただし，以下の議論で，三軸圧縮下での応力パラメーターには下添字 C を付す。

3.1.1　異方圧密時の応力～ひずみ関係

三軸圧縮下で，平均主応力が小さい応力状態 p から応力比 η_C を一定として，p のみ増加するような応力径路に沿って圧密する異方圧密時の塑性ひずみ増分及び塑性ひずみ増分比は次式で与えられる[10]。

$$dv^{p}{}_{a}=\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\ \frac{dp}{p},\ de^{p}{}_{11a}=\frac{\lambda-\kappa}{(1+e)D_a}\cdot\frac{M_C\eta_C}{M_C{}^2-\eta^2{}_C}\ \frac{dp}{p}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(76)$$

$$\left(\frac{de_{11}}{dv}\right)^{p}_{a}=\frac{1}{D_a}\ \frac{M_C\cdot\eta_C}{M_C{}^2-\eta_C{}^2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(77)$$

ここに，de_{11} 及び dv はそれぞれ軸方向の偏差ひずみ増分及び体積ひずみ増分である。上式左辺の上添字 p は塑性成分であることを，下添字 a は異方圧密時の値であることを示している。また，D_a は実験定数であるが，静止土圧係数 K_0 との間に次の関係がある。

$$D_a=\frac{\lambda-\kappa}{\lambda}\ \frac{3M_C\eta_{K_0}}{2(M_C{}^2-\eta_{K_0}{}^2)},\ \eta_{K_0}=\frac{3(1-K_0)}{1+2K_0}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(78)$$

また，M_C は破壊時の応力比 η_C であり，λ，κ はそれぞれ $e\sim\ln\ p$ 図上での圧縮指数及び膨潤指数である。したがって，$e\sim\log_{10}p$ 図上での圧縮指数及び膨潤指数をそれ

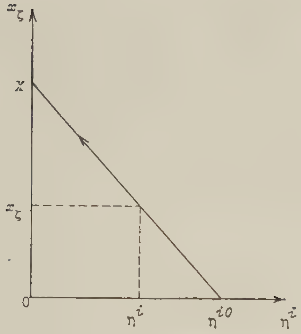


図 4　x_ζ〜η^i 関係の仮定
Assumption used in the relationship between x_ζ and η^i

れぞれC_C及びC_Sとすると，$\lambda=0.434\,C_C$，$\kappa=0.434\,C_S$ の関係がある。

一方，弾性成分は上添字を付して，次のように表わす。

$$dv_a{}^e=\frac{\kappa}{1+e}\frac{dp}{p},\ de_{11}{}^e{}_a=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(79)$$

したがって，全ひずみ増分は，土の降伏過程では次のようになる。

$$\left.\begin{aligned}dv_a&=dv^e{}_a+dv^p{}_a=\frac{\lambda}{1+e}\frac{dp}{p}\\ de_{11a}&=de_{11}{}^e{}_a+de_{11}{}^p{}_a=\frac{\lambda-\kappa}{(1+e)D_a}\\ &\quad\cdot\frac{M_C\eta_C}{M_C{}^2-\eta_C{}^2}\frac{dp}{p}\end{aligned}\right\}\cdots(80)$$

3.1.2　一般応力経路上での応力〜ひずみ関係

異方圧密終了後$dp\geqq0$ で応力比を変化させる応力経路に沿って圧密，せん断するときのひずみ増分は，弾性成分と塑性成分の和として，また，塑性成分はさらにせん断成分と圧密成分の和として次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}dv&=dv^e+dv^p=dv^e+dv^p{}_\eta+dv^p{}_p\\ de_{11}&=de_{11}{}^p=de^p{}_{11\eta}+de_{11}{}^p{}_p\end{aligned}\right\}\cdots(81)$$

ここに，$dv^p{}_\eta$，$de_{11}{}^p{}_\eta$ はp一定せん断時の塑性ひずみ増分（せん断成分）であり，次のように表わされる10)。

$$\left.\begin{aligned}dv^p{}_\eta&=\frac{\Delta e_f}{(1+e)M_C}d\eta_C\\ de_{11}{}^p{}_\eta&=\frac{1}{A}\frac{d\eta_C}{M_C-\eta_C}\\ \left(\frac{de_{11}}{dv}\right)^p_\eta&=\frac{(1+e)M_C}{A\cdot\Delta e_f}\frac{1}{M_C-\eta_C}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(82)$$

式中，A, Δe_f は実験定数であり，特に，Δe_f は等方圧密状態から三軸圧縮下で破壊まで平均有効主応力pを一定としてせん断したときの間げき比の減少量である。一方，塑性ひずみ増分の圧密成分 $dv^p{}_p$, $de_{11}{}^p{}_p$ は一般応力経路上での応力増分（dp, $d\eta$）により生じる全塑性ひずみ増分から，この応力状態からηのみ変化させたときに生じる塑性ひずみ増分 $dv^p{}_\eta$, $de_{11}{}^p{}_\eta$ を差し引いたものである。これは次のように表わしている。

$$\left.\begin{aligned}dv^p{}_p&=\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\frac{dp}{p}\\ de_{11}{}^p{}_p&=\frac{\lambda-\kappa}{(1+e)\cdot d\cdot D_a}\frac{M_{\xi C}\cdot\xi_C}{M_{\xi C}{}^2-\xi_C{}^2}\frac{dp}{p}\\ \left(\frac{de_{11}}{dv}\right)^p_p&=\frac{1}{\alpha\cdot D_a}\frac{M_{\xi C}\cdot\xi_C}{M_{\xi C}{}^2-\xi_C{}^2}\end{aligned}\right\}\cdots(83)$$

ここに，

$$\alpha=\frac{A\cdot D\cdot\Delta e_f}{(1+e)\cdot D_a}\simeq\frac{A\cdot D\cdot\Delta e_f}{(1+e_i)\cdot D_a}\ (\text{一定})\ \cdots\cdots\cdots(84)$$

$$M_{\xi C}=M_C-\eta_{C_0},\ \xi_C=\eta_C-\eta_{C_0}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(85)$$

ここに，Dは新しい実験定数である。α は式(84)より計算されるものであり，定数と考える。また，η_{C_0}は$de_{11}{}^p{}_p=0$となるときの応力比であり，$\eta_C=\eta_{C_i}$ において，$(de_{11}/dv)^p{}_p=(de_{11}/dv)^p{}_a$ が成立するという条件を用いて次のように与えられる。

$$\eta_{C_0}=\frac{(M_C+\eta_{C_i})^2-2\alpha M_C\eta_{C_i}-\sqrt{(M_C{}^2-\eta_{C_i}{}^2)^2+4\alpha^2M_C{}^2\eta_{C_i}{}^2}}{2(M_C+\eta_{C_i})}\cdots(86)$$

上式において，$\alpha=1$のとき，$\eta_{C_0}=0$となり，式(83)で表わされる塑性ひずみ増分の圧密成分は，式(76)で表わされる異方圧密時の塑性ひずみ増分に等しくなる。また，$\eta_{C_i}=0$ のとき，$\eta_{C_0}=0$ となる。

3.2　応力〜ひずみ関係の一般化

3.2.1　異方圧密時の応力〜ひずみ関係

三軸圧縮下では，応力比η_Cを一定として平均主応力pのみを増加する応力経路に沿って行う圧密を異方圧密と定義した。いま，一般応力下においては，式(2)で定義されるη及び cos 3θ の両方を一定として，pのみを増加して圧密する場合を異方圧密と定義する。さて，三軸圧縮下での異方圧密時の応力〜ひずみ関係は式(80)に示したように,応力比η_Cと平均主応力pで表わされた。ここで，3次元的な一般応力条件下の異方圧密時の塑性ひずみ増分は，式(80)において，応力比η_Cを式(2)で表わされるηに置き換え，M_Cの代り式(16)で求められるMを用いて表わされるものとする。また，偏差ひずみ増分のパラメーターとして次のものを導入する。

$$d\epsilon=\sqrt{de_{kl}\ de_{kl}},\ de_{ij}=d\epsilon_{ij}-\frac{1}{3}dv\ \delta_{ij}\cdots(87)$$

ここに，$d\epsilon_{ij}$はひずみ増分テンソル，de_{ij}はその偏差成分である。このとき，式(87)は三軸圧縮下では次のようになる。

$$d\epsilon=\frac{\sqrt{6}}{2}de_{11} \quad \cdots\cdots(88)$$

この関係を用いると，式(76)は次のように書ける。

$$dv^{p}{}_{a}=\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\ \frac{dp}{p},\ d\epsilon^{p}{}_{a}=\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{\lambda-\kappa}{(1+e)D_a}\cdot\frac{M\eta}{M^2-\eta^2}\ \frac{dp}{p} \quad \cdots\cdots(89)$$

このとき，一般応力条件下での異方圧密時の塑性ひずみ増分テンソル$de^{p}{}_{ija}$は次のように表わされると仮定する

$$de^{p}{}_{ija}=d\epsilon^{p}{}_{a}\ N_{ij}=\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{\lambda-\kappa}{(1+e)D_a}\cdot\frac{M\eta}{M^2-\eta^2}\ N_{ij}\ \frac{dp}{p} \quad \cdots\cdots(90)$$

ここに，N_{ij}は式(35)で表わされる正規化された偏差テンソルである。一方，弾性成分は一般応力条件下でも式(79)で表わされるとする。このとき，異方圧密時の全ひずみ増分は次のように表わされる。

$$d\epsilon_{ija}=C_a\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left(\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{M\cdot\eta}{M^2-\eta^2}N_{ij}+\frac{\delta_{ij}}{3}\right)\frac{dp}{p}+\frac{\kappa}{3(1+e)}\ \frac{dp\delta_{ij}}{p} \quad \cdots\cdots(91)$$

ここに，降伏関数をha式(89)より，次のように表わす。

$$h_a(p,\ v^{p}{}_{a})=p-p_i\ \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa}v^{p}{}_{a}\right) \cdots\cdots(92)$$

このとき，C_aは次の値を取る。

$$\left.\begin{array}{ll} h_a(p,\ v^{p}{}_{a})=0\text{で，}dp\geqq 0\text{のとき} & C_a=1 \\ \text{他の場合，} & C_a=0 \end{array}\right\}(93)$$

3.2.2　一般応力経路上での応力～ひずみ関係

はじめに，塑性ひずみ増分のせん断成分について考える。まず，式(82)における応力比増分$d\eta_C$を一般化するために次の近似を行う。すなわち，図5は，式(30)において$\mu\equiv\zeta$として，$\cos 3\theta_\zeta$を一定にしたときのx_ζとζの関係を示したものである。いま，三軸圧縮下で異方圧密を受けた試料が三軸圧縮下で平均主応力一定せん断を受ける場合を考える。このとき，図中の$\cos 3\theta_\zeta=1$の曲線が得られる。ここで，これを次のように直線と仮定する。すなわち，

$$x_\zeta=\sqrt{\frac{2\zeta^2{}_C}{(2\zeta_C+3)(3-\zeta_C)}}\simeq\frac{1}{a}\zeta_C \cdots\cdots(94)$$

ここに，$1/a$は比例定数である。ここで，$\zeta_C=M_{\zeta C}=M_C$のとき（破壊時），式(94)の近似式が正確に成立するようにaを定めると，aは次のように表わされる。

$$a=\sqrt{\frac{(2M_C+3)(3-M_C)}{2}} \cdots\cdots(95)$$

式(82)において，$d\eta_C$の代わりに，簡単のため，$a\cdot dx_\zeta$とおいて，一般応力下の塑性ひずみ増分のせん断成分は次のように書けると近似する。

$$\left.\begin{array}{l} dv^{p}{}_{\eta}=\dfrac{\Delta e_f}{(1+e)M_C}\cdot a\ dx_\zeta=d\cdot a\cdot dx_\zeta \\ d\epsilon^{p}{}_{\eta}=\dfrac{\sqrt{6}}{2}\ de_{11}{}^{p}{}_{\eta}=\dfrac{\sqrt{6}}{2A}\ \dfrac{a\ dx_\zeta}{M_\zeta-\zeta} \end{array}\right\}\cdots(96)$$

$$\left(\frac{d\epsilon}{dv}\right)^{p}_{\eta}=\frac{\sqrt{6}}{2A\cdot d}\ \frac{1}{M_\zeta-\zeta} \quad \cdots\cdots(97)$$

ここに，

$$d=\frac{\Delta e_f}{(1+e)M_C}\simeq\frac{\Delta e_f}{(1+e_i)M_C} \quad \cdots\cdots(98)$$

上式中，dは一般にダイレタンシー係数と呼ばれるもので，三軸圧縮下でのp一定せん断時の$v\sim\eta$関係の勾配を表わしている。また，式(96)，(97)において，ζは式(4)により定義される応力比であり，M_ζは，式(60)～(62)より計算されるk_ζを用いて，式(71)より計算される。また，dx_ζは式(74)を用いて，式(41)より計算される。このとき，塑性偏差ひずみ増分テンソルのせん断成分$de_{ij}{}^{p}{}_{\eta}$は次のように表わされるものと仮定する。

$$de_{ij}{}^{p}{}_{\eta}=d\epsilon^{p}{}_{\eta}N_{ij}{}^{\zeta}=\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{N_{ij}{}^{\zeta}}{A}\ \frac{a\cdot dx_\zeta}{M_\zeta-\zeta} \cdots(99)$$

ここに，$N_{ij}{}^{\zeta}$は式(35)より計算される。弾性ひずみ増分のせん断成分はゼロと仮定する。すなわち，

$$dv^{e}{}_{\eta}=0,\ d\epsilon^{e}{}_{\eta}=0 \cdots\cdots(100)$$

このとき，全ひずみ増分のせん断成分は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ij\eta}&=C_\eta\left(de_{ij}{}^{p}{}_{\eta}+\frac{1}{3}dv^{p}{}_{\eta}\delta_{ij}\right) \\ &=C_\eta\left\{\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{N_{ij}{}^{\zeta}\cdot a}{A(M_\zeta-\zeta)}+\frac{d\cdot a}{3}\delta_{ij}\right\}dx_\zeta \cdots(101) \end{aligned}$$

塑性ひずみ増分のせん断成分に対する降伏関数を$h_\eta(x_\zeta,\ v^{p}{}_{\eta})$とする。これは式(96)より次のように表わす。

$$h_\eta(x_\zeta,\ v^{p}{}_{\eta})=x_\zeta-\frac{1}{d\cdot a}v^{p}{}_{\eta} \quad \cdots\cdots(102)$$

このとき，C_ηは次の値を取る。

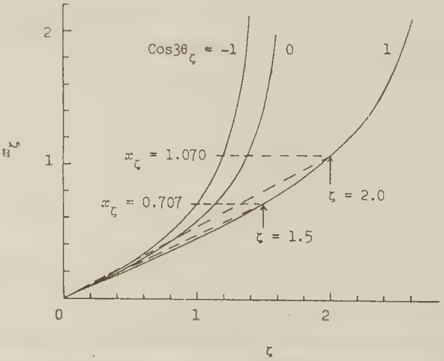


図5　$x_\zeta\sim\zeta$関係
Relationship between x_ζ and ζ

$$\left.\begin{array}{ll} h_\eta=0,\ dx_\zeta\geqq 0\ \text{のとき} & C_\eta=1 \\ \text{この他の場合} & C_\eta=0 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (103)$$

つぎに，式(83)で与えられる塑性ひずみ増分の圧密成分についても考える。式(83)中の応力パラメーター$M_{\xi C}$，ξ_Cは一般応力下ではM_ξ及びξで表わされるものとする。すなわち，

$$\left.\begin{array}{l} dv^p{}_p=\dfrac{\lambda-\kappa}{1+e}\ \dfrac{dp}{p} \\[2ex] d\epsilon^p{}_p=\dfrac{\sqrt{6}\,(\lambda-\kappa)}{2(1+e)\alpha D_a}\ \dfrac{M\cdot\xi}{M_\xi{}^2-\xi^2}\ \dfrac{dp}{p} \\[2ex] \left(\dfrac{d\epsilon}{dv}\right)^p_p=\dfrac{\sqrt{6}}{2}\ \dfrac{M_\xi\cdot\xi}{\alpha\cdot D_a(M_\xi{}^2-\xi^2)} \end{array}\right\} \cdots (104)$$

式中，M_ξはM_ζの場合と同様に式(69)よりk_ξを求め，これを用いて，式(67)より計算した$\xi_{ij}{}^f$を用い，式(71)より計算される。このとき，塑性偏差ひずみ増分テンソルの圧密成分$de_{ij}{}^p{}_p$を次のように表わす。

$$de_{ij}{}^p{}_p=d\epsilon^p{}_p\ \ N_{\xi ij}=\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{\lambda-\kappa}{(1+e)\alpha\cdot D_a}$$
$$\cdot\frac{M_\xi\cdot\xi}{M_\xi{}^2-\xi^2}N_{ij}{}^\xi\frac{dp}{p}\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (105)$$

いま，弾性成分を次のようにおく。

$$dv^e{}_p=\frac{\kappa}{1+e}\ \frac{dp}{p},\ d\epsilon^e{}_p=0\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (106)$$

ここで，式(105)中の$N_{ij}{}^\zeta$は式(35)で計算される。$\eta_{ij}=\eta_{ij}{}^0$のとき，$\xi_{ij}=\xi=0$であるから，式(104)，(105)より，$d\epsilon^p{}_p=de_{ij}{}^p{}_p=0$である。すなわち$(\eta_{ij}{}^0)$は塑性偏差ひずみ増分テンソル$de_{ij}{}^p{}_p$をゼロとする応力状態であることが分かる。三軸圧縮下の場合と同様に考えると，この応力状態は基準応力状態$(\eta_{ij}{}^i)$が異なれば，異る。三軸圧縮下の場合には，$\eta_C=\eta_{C_i}$では$(de_{11}/dv)^p{}_p=(de_{11}/dv)^p{}_a$という条件より，$\eta_{C_0}$として式(86)の関係を得た。この考えを一般応力状態まで拡張すれば，応力状態$(\eta_{ij}{}^i)$において$(de_{ij}/dv)^p{}_p=(de_{ij}/dv)^p{}_a$を満足するように$(\eta^0{}_{ij})$を定めればよいことになる。しかし，この方法では9個の未知数より成る連立方程式を解くことになり，式が非常に複雑となる。ここでは，近似的に次の方法により，$\eta_{ij}{}^0$を求める。すなわち，図3に示したように，$(\eta_{ij}{}^i)$及び$(\eta_{ij}{}^0)$に対応する2つの応力状態$(\sigma_{ij}{}^i)$，$(\sigma_{ij}{}^0)$は同じ偏角θを持つものと仮定する。また，式(94)において，x_ζ，ζ_Cの代わりに，x，η_Cとおいて，次の近似式を仮定する。

$$\eta_{C_0}=a\cdot x_0,\ \eta_{C_i}=a\cdot x_i,\ M_C=a\cdot X\ \cdots\cdots\cdots\cdots (107)$$

この関係を式(86)に代入する。

$$x_0=\frac{(X+x_i)^2-2\alpha Xx_i-\sqrt{(X^2-x_i{}^2)^2+4\alpha^2X^2x_i{}^2}}{2(X+x_i)}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (108)$$

上式を用いると，応力状態$(\eta_{ij}{}^i)$に対する応力パラメーターx_iと破壊時の応力パラメーターより，x_0を求めることができる。x_0が分かると，$\theta^0=\theta^i$であるからx_0に対応するη^0を式(22)〜(24)において，それぞれX，$\cos 3\theta_f$の代わりにx_0，$\cos 3\theta^i$を代入したときのMの値として，求めることができる。これを用いると，$(\eta_{ij}{}^0)$は次のように求まる。

$$\eta_{ij}{}^0=\frac{\eta^0}{\eta^i}\,\eta_{ij}{}^i\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (109)$$

すなわち，$(\eta_{ij}{}^0)$は，$(\eta_{ij}{}^i)$が定まれば一義的に定まる。式(108)において，$\alpha=1$のとき$x_0=0$となり，$d\epsilon_{ija}=d\epsilon_{ijp}$となることは容易に分かる。

式(105)，(106)より，一般応力経路上での全ひずみ増分の圧密成分は次のように書ける。

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ijp}&=C_p\ d\epsilon_{ij}{}^p{}_p+d\epsilon^e{}_{ijp} \\ &=C_p\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left\{\frac{\sqrt{6}}{2\alpha\cdot D_a}\ \frac{M_\xi\cdot\xi}{M_\xi{}^2-\xi^2}N_{ij}{}^\xi\right. \\ &\quad\left.+\frac{1}{3}\delta_{ij}\right\}\frac{dp}{p}+\frac{\kappa}{3(1+e)}\ \frac{dp}{p}\delta_{ij}\cdots\cdots\cdots (110) \end{aligned}$$

塑性ひずみ増分の圧密成分に対応する降伏関数を$h_p(p,\ v^p{}_p)$とすると，これは式(104)より次のように表わされる。

$$h_p(p,\ v^p{}_p)=p-p_i\ \exp\frac{(1+e_i)v^p{}_p}{\lambda-\kappa}\cdots\cdots\cdots (111)$$

このとき，C_pは次の値を取る。

$$\left.\begin{array}{ll} h_p=0,\ dp\geqq 0 & ,\ \ C_p=1 \\ \text{この他の場合,} & \ \ \ C_p=0 \end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (112)$$

以上により，一般応力経路上での全ひずみ増分は，式(101)，(110)より次のように与えられる。

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ij}&=d\epsilon_{ij\eta}+d\epsilon_{ijp} \\ &=C_\eta\left\{\frac{\sqrt{6}}{2A}\ \frac{N_{ij}{}^\zeta}{(M_\zeta-\zeta)}+\frac{d}{3}\delta_{ij}\right\}a\cdot dx_\zeta \\ &\quad+C_p\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left\{\frac{\sqrt{6}}{2\alpha\cdot D_a}\ \frac{M_\xi\ \xi}{M^2{}_\xi-\xi^2}N_{ij}{}^\xi+\frac{1}{3}\delta_{ij}\right\} \\ &\quad\cdot\frac{dp}{p}+\frac{\kappa}{3(1+e)}\ \frac{dp}{p}\delta_{ij}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (113) \end{aligned}$$

ここで，式(41)及び

$$dp=\frac{1}{3}\delta_{kl}\ d\sigma_{kl}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (114)$$

の関係を式(113)に代入すると，ひずみ増分は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ij}&=C_\eta\left(\frac{\sqrt{6}}{2A}\ \frac{N_{ij}{}^\zeta}{M_\zeta-\zeta}+\frac{d}{3}\partial_{ij}\right)a\cdot L_{kl}{}^\zeta\ d\sigma_{kl} \\ &\quad+C_p\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left(\frac{\sqrt{6}}{2\alpha\cdot D_a}\ \frac{M_\xi\cdot\xi}{M^2{}_\xi-\xi^2}N_{ij}{}^\xi+\frac{1}{3}\partial_{ij}\right) \\ &\quad\cdot\frac{\partial_{kl}}{3p}d\sigma_{kl}+\frac{\kappa}{9(1+e)}\ \frac{\partial_{ij}\ \partial_{kl}}{p}d\sigma_{kl} \end{aligned}$$

$$=C_{ijkl}\ d\sigma_{kl} \tag{115}$$

ここに，

$$C_{ijkl}=C_\eta\left(\frac{\sqrt{6}}{2A}\ \frac{N_{ij}{}^\zeta}{M_\zeta-\zeta}+\frac{d}{3}\delta_{ij}\right)a\ L_{kl}{}^\zeta$$

$$+C_p\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left(\frac{\sqrt{6}}{2\alpha D_a}\ \frac{M_\xi\cdot\xi}{M_\xi{}^2-\xi^2}\ N_{ij}{}^\xi+\frac{1}{3}\delta_{ij}\right)$$

$$\cdot\frac{\delta_{kl}}{3p}+\frac{\kappa}{9(1+e)}\ \frac{\delta_{ij}\ \delta_{kl}}{p} \tag{116}$$

3.3　まとめ

前節において，三軸圧縮条件下の応力～ひずみ関係をもとにして，一般応力下での関係が求められた。ここでは，得られた関係を整理してまとめる。

3.3.1　異方圧密時の応力～ひずみ関係

応力パラメーター η, cos 3θ を一定として p のみ増加する応力経路に沿って試験する異方圧密時のひずみ増分テンソルは式(91)より次のように表わされる。

$$d\epsilon_{ija}=C^a{}_{ijkl}\ d\sigma_{kl} \tag{117}$$

ここに，

$$C^a{}_{ijkl}=C_a\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left(\frac{\sqrt{6}}{2}\ \frac{M\eta}{M^2-\eta^2}N_{ij}+\frac{\delta_{ij}}{3}\right)\frac{\delta_{kl}}{3p}$$

$$+\frac{\kappa}{9(1+e)}\ \frac{\delta_{ij}\delta_{kl}}{p} \tag{118}$$

ここに，

$$N_{ij}=\frac{\nu_{ij}}{(\nu_{kl}\nu_{kl})^{1/2}} \tag{35bis}$$

$$\nu_{ij}=\frac{1}{p}(\Phi_1\eta_{ij}+\Phi_2\tau_{ij}) \tag{29bis}$$

$$\Phi_1=9(3x^2+2),\ \Phi_2=-27(x^2+1) \tag{28bis}$$

$$h_a(p,v^p{}_a)=p-p_i\exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa}v^p{}_a\right) \tag{92bis}$$

とするとき，

$$\left.\begin{array}{ll}h_a(p,\ v^p{}_a)=0\ \text{で，}\ dp\geqq 0\ \text{のとき，} & C_a=1\\ \text{他の場合} & C_a=0\end{array}\right\} \tag{93bis}$$

式(117)中の係数テンソル $C^a{}_{ijkl}$ に含まれる応力パラメーターはいずれも，圧密時の有効応力状態 (σ_{ij}) より求めることができる。したがって，式(117)より，有効応力状態 (σ_{ij}) とその増分 $(d\sigma_{ij})$ が与えられると，これにより生じるひずみ増分 $(d\epsilon_{ija})$ を求めることができる。

3.3.2　一般応力経路上での応力～ひずみ関係

ここでは，$(p, \eta, \cos 3\theta)$ が同時に変化する場合の応力～ひずみ関係をまとめる。このときのひずみ増分テンソルは次のように表わされる。

$$d\epsilon_{ij}=C_{ijkl}\ d\sigma_{kl} \tag{115bis}$$

ここに，

$$C_{ijkl}=C_\eta\left(\frac{\sqrt{6}}{2A}\ \frac{N_{ij}{}^\zeta}{M_\zeta-\zeta}+\frac{d}{3}\delta_{ij}\right)a\cdot L_{kl}{}^\zeta$$

$$+C_p\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left(\frac{\sqrt{6}}{2\alpha D_a}\ \frac{M_\xi\cdot\xi}{M_\xi{}^2-\xi^2}N_{ij}{}^\xi+\frac{1}{3}\delta_{ij}\right)$$

$$\cdot\frac{\delta_{kl}}{3p}+\frac{\kappa}{9(1+e)}\ \frac{\delta_{ij}\ \delta_{kl}}{p} \tag{116bis}$$

$$N_{ij}{}^\mu=\frac{\nu_{ij}{}^\mu}{(\nu_{kl}{}^\mu\ \nu_{kl}{}^\mu)^{1/2}}\ (\mu\equiv\zeta\text{又は}\xi) \tag{35bis}$$

$$\nu_{ij}{}^\mu=\frac{1}{p}(\Phi_1{}^\mu\mu_{ij}+\Phi_2{}^\mu\tau_{ij}{}^\mu) \tag{34bis}$$

$$L_{ij}{}^\zeta=\frac{1}{L}\ (\Phi_0{}^\zeta\delta_{ij}+\Phi_1{}^\zeta\zeta_{ij}+\Phi_2{}^\zeta\tau^\zeta{}_{ij}) \tag{74bis}$$

$$L=p\left\{\frac{4\zeta^2}{x_\zeta}(3-\zeta\cos 3\theta_\zeta)-\frac{1}{X}\ (\Phi_1{}^\zeta\zeta_{kl}+\Phi_2{}^\zeta\tau_{kl}{}^\zeta)\eta_{kl}{}^{i0}\right\} \tag{75bis}$$

$$\left.\begin{array}{l}\Phi_0{}^\mu=3\{3(x_\mu{}^2+1)\mu_{lm}\ \mu_{mk}-(3x_\mu{}^2+2)\ \mu_{kl}\}\eta_{kl}\\ \Phi_1{}^\mu=9(3x_\mu{}^2+2)\\ \Phi_2{}^\mu=-27(x_\mu{}^2+1)\qquad\qquad(\mu\equiv\zeta\text{又は}\xi)\end{array}\right\}$$

$$h_\eta(x_\zeta,\ v^p{}_\eta)=x_\zeta-\frac{1}{d\cdot a}v^p{}_\eta \tag{102bis}$$

とすると，

$$\left.\begin{array}{ll}h_\eta=0\ \text{で，}\ dx_\zeta\geqq 0\ \text{のとき，} & C_\eta=1\\ \text{他の場合，} & C_\eta=0\end{array}\right\} \tag{103bis}$$

一方，

$$h_p(p,v^p{}_p)=p-p_i\exp\frac{(1+e_i)v^p{}_p}{\lambda-\kappa} \tag{111bis}$$

とおくと，

$$\left.\begin{array}{ll}h_p=0\ \text{で，}\ dp\geqq 0\ \text{のとき，} & C_p=1\\ \text{他の場合，} & C_p=0\end{array}\right\} \tag{112bis}$$

式(115)中の係数テンソル C_{ijkl} に含まれる応力パラメーターは，異方圧密終了時の応力状態 $(\sigma_{ij}{}^{i0})$ と試験時の応力状態 (σ_{ij}) の関数となっている。したがって，これらの2つの応力状態 $(\sigma_{ij}{}^{i0})$ 及び (σ_{ij}) とその増分 $(d\sigma_{ij})$ が与えられると，式(115)よりひずみ増分 $(d\epsilon_{ij})$ を求めることができる。

3.3.3　実験定数及びその決定法

上に示した応力～ひずみ関係を計算するのに必要な実験定数について述べる。応力～ひずみ関係の計算には，表1に示すような8個の定数が必要である。表中，λ, κ は $e\sim\ln p$ 図上での圧縮指数及び膨潤指数であり，一般に用いられる $e\sim\log_{10}p$ 図上での圧縮指数，膨潤指数をそれぞれ C_C, C_S とすると，次の関係がある。

$$\lambda=0.434\,C_C,\qquad \kappa=0.434\,C_S \tag{119}$$

これらの定数より，応力～ひずみ関係式中のダイレタンシー係数 d は次のように表わせる。

$$d=\frac{\Delta e_f}{(1+e_i)M_C}\cdots\cdots\cdots(98\mathrm{bis})$$

また，次の関係を用いた。

$$\alpha=\frac{A\cdot D\cdot \Delta e_f}{(1+e_i)\cdot D_a}\cdots\cdots\cdots(84\mathrm{bis})$$

$$a=\sqrt{\frac{(2M_C+3)(3-M_C)}{2}}\cdots\cdots\cdots(95\mathrm{bis})$$

$$D_a=\frac{\lambda-\kappa}{\lambda}\,\frac{3M_C\ \eta_{K_0}}{2(M_C{}^2-\eta_{K_0}{}^2)},\quad \eta_{K_0}=\frac{3(1-K_0)}{1+2K_0}\cdots\cdots\cdots(78\mathrm{bis})$$

$$X=\frac{2\sqrt{2}}{3}\tan\ \phi'_C\cdots\cdots\cdots(17\mathrm{bis})$$

つぎに，表1に示した各実験定数の求め方について述べる。これらの各定数値はいずれも，普通に行われる三軸圧縮試験より求めることができる。すなわち，λ,κ は，土の等方圧密及び膨潤試験より得られる。A, Δe_f, X は等方圧密後の土の平均主応力一定試験より得られる。D は，平均主応力 p と応力比 η を同時に増加する一般応力経路に沿う試験より求めることができる。一般的にはこのような応力経路の試験の1つである側圧一定試験より求めればよいと思われる。一方，静止土圧係数 K_0 は直接には供試体の側方ひずみをゼロとなるように軸圧，側圧を増加していく，いわゆる K_0 ー圧密試験より求めることができる。しかし，この試験はかなり手間のかかる試験であるため，簡単には次の Jaky の式より求めることもできる。

$$K_0=1-\sin\ \phi'_C\cdots\cdots\cdots(120)$$

また，表1中の C_a は，等方圧密したときの処女圧密曲線の $p=1$ kgf/cm² での間げき比である。以上を総合すると，表1に示した全実験定数を定めるためには，次のような実験を行う必要がある。すなわち，三軸試験機により，初めに，土供試体の等方圧密膨潤再圧密試験を行い，この後，引き続き，平均主応力一定の排水せん断試験を行う。つぎに，別の土供試体を用い，等方圧密した後，側圧一定で排水せん断試験を行う。これらの2つの試験を行うことにより，表1に示した各定数値を決定することができる。

4.　応力〜ひずみ関係の計算結果

4.1　概　説

前章において，異方圧密粘性土の一般応力条件下での応力〜ひずみ関係式(115)が得られた。ここでは，これを用いて，3主応力条件下に限って，その変形挙動を計算し，ここに示した応力〜ひずみ関係の持つ特性について考察を行う。

応力〜ひずみ関係の実際の計算に当っては，まず，初めに計算しようとする応力経路を与え，この応力経路上の応力状態 $(\sigma_1,\ \sigma_2,\ \sigma_3)$ とその増分 $(d\sigma_1,\ d\sigma_2,\ d\sigma_3)$ に対し，式(115)を用いて数値的に，ひずみ増分 $(d\epsilon_1,\ d\epsilon_2,\ d\epsilon_3)$ を計算する。そして，これを順次，加え合わせていくことにより，せん断開始時からのひずみ $(\epsilon_1,\ \epsilon_2,\ \epsilon_3)$ を求める。

ここで計算結果の表示に用いた応力及びひずみのパラメーター $(p,\ q,\ \eta)$, $(q_\zeta,\ \zeta)$ 及び $(q_\xi,\ \xi)$ は，次のように示される。

$$\left.\begin{aligned}&p=\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)\\&q=\left[\frac{1}{2}\{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2\right.\\&\qquad\left.+(\sigma_3-\sigma_1)^2\}\right]^{1/2}\\&\eta=\frac{q}{p}\end{aligned}\right\}\cdots(121)$$

$$\left.\begin{aligned}&\zeta=\eta-\eta^i=\frac{q}{p}-\frac{q^i}{p^i}\\&q_\zeta=p\cdot\zeta=q-\frac{p}{p^i}\,q^i\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(122)$$

$$\left.\begin{aligned}&\xi=\eta-\eta^0=\frac{q}{p}-\frac{q^0}{p^0}\\&q_\xi=p\cdot\xi=q-\frac{p}{p^0}\cdot q^0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(123)$$

ここに，η^i はせん断開始時の η であり，そのときの応力状態 $(\sigma_1{}^i,\ \sigma_2{}^i,\ \sigma^i{}_3)$ より求められる。一方，η^i が分ると η^0 は η^i の関数として求めることができる（式(108)，(109)参照)。

いま，図6(a)に示したように，3主応力 $(\sigma_1,\ \sigma_2,\ \sigma_3)$ を座標軸にとって応力状態を表わす。図6(b)は，同図(a)において，原点を通り，静水圧軸 ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ の軸) に垂直な面（いわゆる π 面）に，応力経路を投影したものである。このとき，π 面上において，原点よりその応力点までの距離を r, σ_1 軸からの角度を θ とする。この

表1　解析に用いる実験定数

Table 1　Experimental contants used in the analysis

λ	0.106	K_0	0.43
κ	0.0187	D	0.66
A	54	X	0.707
Δe_f	0.0303	e_a	1.084

とき，r, θ は次のように表わされる。

$$r=\sqrt{6}\,q,\ \cos 3\theta=\frac{27\eta_1\eta_2\eta_3}{2\eta^3}\cdots(124)$$

ここに，

$$\eta_k=\frac{\sigma_k}{p}-1\quad(k=1,\ 2,\ 3)\ \cdots\cdots(125)$$

である。また，（$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$）は（$p, \eta, \theta$）を用いて，次のように表わされる（図6 (b)参照）。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1&=p\left(1+\frac{2}{3}\eta\cos\theta\right)\\ \sigma_2&=p\left\{1+\frac{2}{3}\eta\cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right)\right\}\\ \sigma_3&=p\left\{1+\frac{2}{3}\eta\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right\}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(126)$$

一方，（p, ζ, θ_ζ）を用いて，（$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$）を表わすと次のようになる（図6 (c)参照）。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1&=p\left[1+\frac{2}{3}(\eta^i\cos\theta^i+\zeta\cos\theta_\zeta)\right]\\ \sigma_2&=p\left[1+\frac{2}{3}\left\{\eta^i\cos\left(\theta^i-\frac{2}{3}\pi\right)\right.\right.\\ &\qquad\left.\left.+\zeta\cos\left(\theta_\zeta-\frac{2}{3}\pi\right)\right\}\right]\\ \sigma_3&=p\left[1+\frac{2}{3}\left\{\eta^i\cos\left(\theta^i+\frac{2}{3}\pi\right)\right.\right.\\ &\qquad\left.\left.+\zeta\cos\left(\theta_\zeta+\frac{2}{3}\pi\right)\right\}\right]\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(127)$$

つぎに，ひずみについて考える。3主ひずみを（$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$）とすると，体積ひずみ$v$，八面体せん断ひずみ$\gamma$は次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}v&=\epsilon_1+\epsilon_2+\epsilon_3\\ \gamma&=\frac{2}{3}\left\{(\epsilon_1-\epsilon_2)^2+(\epsilon_2-\epsilon_3)^2+(\epsilon_3-\epsilon_1)^2\right\}^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\right\}\cdots(128)$$

このとき，図7に示したように，ひずみに関するπ面上での原点からの距離R及び偏角Θは次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}R&=\frac{3\sqrt{6}}{2}\gamma\\ \cos 3\Theta&=\frac{8\sqrt{2}\,e_1e_2e_3}{\gamma^3}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(129)$$

ここに，e_1, e_2, e_3 は偏差ひずみで，次のように書ける。

$$e_k=\epsilon_k-\frac{1}{3}v\quad(k=1,\ 2,\ 3)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(130)$$

したがって，式(124)より得られる（r, θ）を用いると，応力状態（$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$）の$\pi$面上での座標を求めることができる。同様に，式(129)より得られる（R, Θ）より，ひずみ状態（$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$）の$\pi$面上での座標を求めることができる。

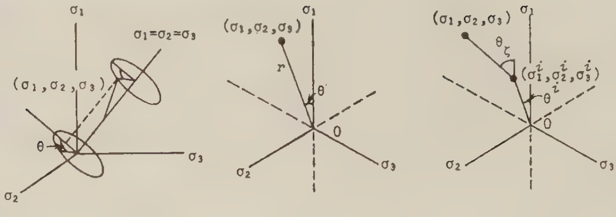


図　6　(a) 3主応力空間での応力状態，(b)π面上での応力状態，(c) 異方圧密後の応力状態

(a) Stress state in the three principal stress space, (b) Stress state on the π-plane, (c) Stress state after anisotropic consolidation

以下の計算には，すべて表1に示した実験定数を用いた。

4.2　軸対称応力下での応力～ひずみ関係

初めに，一般に行われる三軸試験機を用いた三軸圧縮試験及び伸張試験と同じ軸対称の応力条件下での応力～ひずみ関係の計算結果を示す。図8は計算に用いた応力経路をq～p関係で示したものである。応力経路は$p=2\mathrm{kgf/cm^2}$で，pを一定としてqを増加する平均主応力一定経路と，$p=2\mathrm{kgf/cm^2}$まで等方圧密（$\eta^{i0}=0$）及び異方圧密（$\eta^{i0}=0.5$）した後，pとqを同時に増加する応力経路を示している。いずれも応力経路は，q～p図上で直線となるものを用いている。上に述べたpを増加する応力経路では，等方圧密したものに対しては，応力点（p, η）＝（p^{i0}, η^{i0}）＝(2,0) と（p, η）＝(4,0.5)を通る直線となっている。また，異方圧密したものに対しては，応力点（p^{i0}, η^{i0}）＝(2,0.5) 及び（p, η）＝(4,0.5) を通る直線となっている。同図中には，松岡，中井[9]の破壊基準より計算される三軸圧縮下（$M_C=1.5$）及び三軸伸張下（$M_E=1.0$）の破壊包絡線を破線で示している。

図9は軸対称応力下で，平均主応力pを一定として，三軸圧縮及び伸張状態でせん断するときの応力～ひずみ関係の計算結果を示している。これらの関係は，平均主応力を一定とした場合のものなので，応力～ひずみ関係式 (115) においは，右辺第1項のせん断成分のみによるものであり，第2項の圧密成分及び第3項の弾性成分の項はゼロとなっている。図 (a) は，応力比ηと八面体せん断ひずみγの関係を示している。いずれの曲線も，三軸圧縮下及び伸張下で破線で示されるそれぞれの破壊線に漸近している。図(b) は，体積ひずみvと応力比ηの関係である。等方試料（$\eta^{i0}=0$）のv～η曲線をみると，三軸圧縮下での最終ひずみは，三軸伸張下でのそれに，ほ

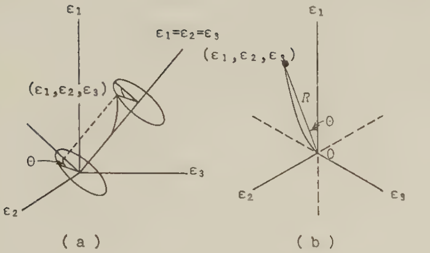


図 7 (a) 3主ひずみ空間でのひずみ状態，
(b) π 面上でのひずみ状態

(a) Strain state in three principal strain space, (b) Strain state on the π-plane

ぼ，等しくなっている。また，$v\sim\eta$ 曲線は，三軸伸張下で破壊するものについて，やや，下に凸になる傾向があるが近似的にほぼ直線関係とみなすことができる。以上，ここで述べた軸対称応力下で平均主応力を一定としてせん断する場合の応力～ひずみ曲線の特徴は，著者が既に示した実験結果10)をほぼ定性的に説明するものとなっている。

図10は，平均主応力 p を一定としてせん断する場合と p を増加しながらせん断する場合の応力～ひずみ関係の比較を示したものである。図中，破線は平均主応力 p を一定としてせん断したときの関係であり，図9に示したものと同じである。一方，実線で示される関係は，平均主応力 p を増加しながら，同時に，応力比 η も増加する場合である。したがって，この場合は，式(115)の応力～ひずみ関係で右辺の第1項（せん断成分），第2項（圧密成分），第3項（弾性成分）のすべてがゼロでない場合である。図(a)は，応力比 η と八面体せん断ひずみ γ の関係である。破線で示される p 一定せん断の場合に比べ，p が増加する場合は，同じ応力比ではせん断ひずみがかなり大きくなっている。これは，せん断ひずみのせん断成分に加えて，圧密成分も生じているためである。このような傾向は，著者10)が実験的に既に示している。図(b)は体積ひずみ v と応力比 η の関係である。この場合も，実線で示される平均主応力が増加する場合は，破線で示される p 一定下でのせん断成分（負のダイレタンシー）に加えて，圧密成分と弾性成分が加算されている。

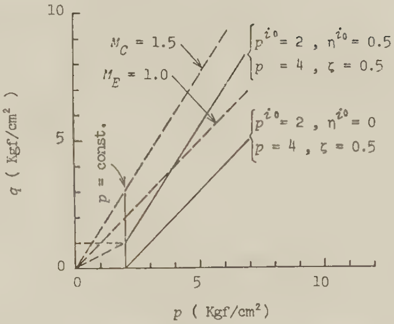


図 8 軸対称応力下での応力経路

Stress paths under axisymmetric stresss condition

以上，図9，10でみたように，式(115)より計算される応力～ひずみ曲線は，軸対称応力下において，平均主応力 p を一定としてせん断する場合及び増加しながらせん断する場合に対し，既に得られている実験結果を定性的に説明するものとなっている。

4.3 平均主応力一定応力下での応力～ひずみ関係

ここでは，式(115)を用いて，種々の応力ベクトルの偏角 θ を持って，平均主応力一定のもとでせん断すると

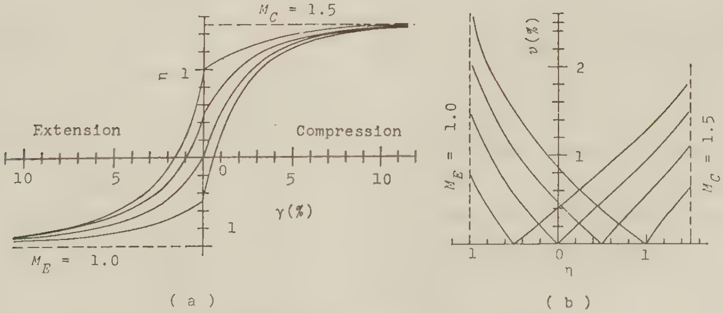


図 9 軸対称応力下での応力～ひずみ関係
(a) $\eta\sim\gamma$ 関係，(b) $v\sim\eta$ 関係

Relationship between stress and strain (a) $\eta\sim\gamma$ relationship, (b) $v\sim\eta$ relationship

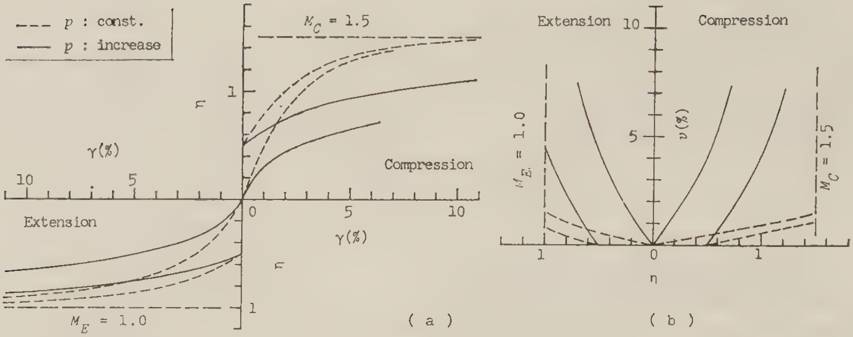


図 10　軸対称応力下での応力～ひずみ関係の比較，(a) $\eta\sim\gamma$ 関係，(b) $v\sim\eta$ 関係
Comparison of relationships between stress and strain
(a) $\eta\sim\gamma$ relationships, (b) $v\sim\eta$ relationships

きの応力～ひずみ曲線の計算結果を示す。ここで扱うのは，平均主応力が一定の場合であるから，計算の結果として求められるひずみは，式（115）の右辺第1項のせん断成分のみによるものである。計算結果の表示において，応力パラメーターとして，式（4）で示される ζ を用いたが，これは，ζ がせん断とともに単調に増加する量であるためである。

4.3.1　等方圧密試料の応力～ひずみ関係

ここでは，平均主応力 $p=2\text{kgf/cm}^2$ まで等方圧密した試料が，図11に示すように p を一定として，$\theta=0°$, 30°, 60, 90°, 120°, 150°, 180°を持つ直線の応力経路に沿ってせん断される場合について，応力～ひずみ曲線の計算結果を示す。等方圧密試料であるので，$\theta=0°$ と 120° の試料は同じ変形挙動を示す。また，$\theta=30°$, 90°, 150° の試料も互いに同じ挙動を示し，$\theta=60°$ の試料は $\theta=180°$ の試料と同じ挙動を示す。$\theta=0°$, 120° の応力状態は，三軸圧縮試験に相当し，$\theta=60°$，180°の応力状態は，三軸伸張試験に相当する。$\theta=30°$, 90°, 150°の場合は，両者の中間であり，3主応力が異る場合である。図中には，$X=0.707$ ($\phi c'=26.9°$) の場合の式(16)で示される松岡，中井[9] の破壊基準による破壊包絡線も同時に示している。

図12に，得られた応力～ひずみ曲線を示す。図(a)は，応力比 ζ と八面体せん断ひずみ γ の関係である。この場合は，$\eta^{i0}=0$ であるから，式（3），（4）より，$\zeta=\eta$ である。同図中には，松岡，中井[9] の基準から計算される $\theta=0°$, 30°, 60°に対する破壊線を破線で示している。図中に示したように，$\theta=0°$, 30°, 60°に対する破壊時の応力比 M は，それぞれ，$M_0=1.5$，$M_{30}=1.13$，$M_{60}=1.00$ である。図(a)において，$\zeta(=\eta)\sim\gamma$ 曲線は，それぞれの破壊線に漸近するように，ζ が増加し，破壊に至っている。図(b)は，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係である。θ が 0°から30°，60°と変化するのに対して，$v\sim\zeta$ 曲線は下に凸の曲線となる傾向がある。また，破壊付近の v の値は θ にあまり関係なく，ほぼ同じになっている。すなわち，この理論では，等方圧密試料のダイレタンシーは，応力ベクトルの偏角 θ にあまり影響されず，一定であることを示している。

図13は，π 面上に投影したひずみ経路を示している（図7参照）。$\theta=0°$，60°，120°，180° のひずみ経路は直線となっているが，$\theta=30°$，90°，150° のひずみ経路は，曲線となっている。これは，式(30)で示される塑性ポテンシャルの形状が，図1に示したように，π 面上において，せん断の進行とともに，円に近いものから，次第に三角形に近いものに変化することによるものである。このように，π 面上で直線で示される応力経路に対して，$\theta=30°$，90°，150° の場合のように，三軸伸張下のひずみ経路 ($\theta=60°$, 180°) の方向に曲がるような曲線のひずみ経路が生ずる傾向は，Yong and Mckyes[12]，

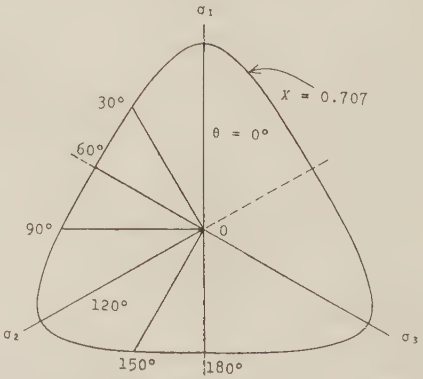


図 11　等方圧密試料の π 面上での応力経路
Stress paths of isotropic specimens on the π-plane

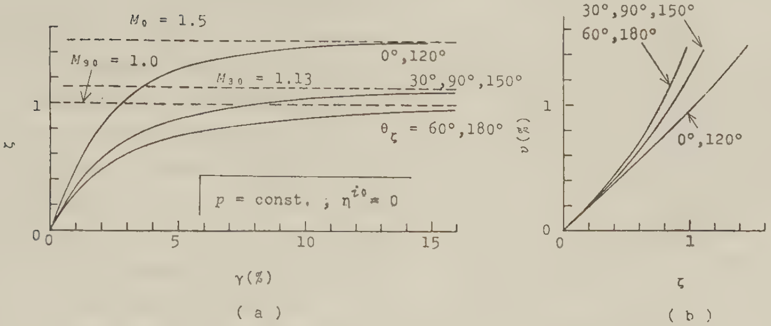


図 12　等方圧密試料 ($\eta^{i0}=0$) の応力〜ひずみ関係,
(a) $\zeta\sim\gamma$ 関係, (b) $v\sim\zeta$ 関係

Stress-strain relationships of isotropic specimens ($\eta^{i0}=0$)
(a) $\zeta\sim\gamma$ relationship, (b) $v\sim\zeta$ relationship

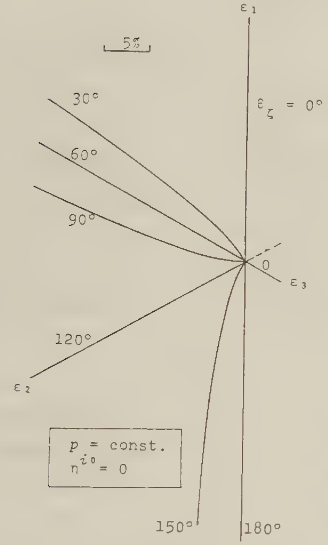


図 13　等方圧密試料の π 面上でのひずみ経路

Strain paths of isotropic specimens on the π-plane

Lade and Duncn[13]，宮森[14] の実験結果からも伺われる。

4.3.2　三軸圧縮下で異方圧密した試料の応力〜ひずみ関係

ここでは，三軸圧縮下で $p=2\mathrm{kgf/cm^2}$ まで異方圧密した試料 ($p^{i0}=2\mathrm{kgf/cm^2}$, $\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0$) を，平均主応力 p を一定として，図14 に示す $\theta_\zeta=0°$，30°，60°，90°，120°，150°，180° の直線（実線）の応力経路に沿ってせん断する場合の応力〜ひずみ曲線の計算結果を示す。同図中には，各 θ_ζ に対応する等方応力状態からせん断するときの応力経路を破線で示している。これは，図11に示した応力経路と同じものである。

図15は，上に示した応力経路に対する異方圧密試料の応力〜ひずみ関係である。この場合は，等方圧密試料の場合と異って，応力経路の偏角 θ_ζ が異なると，応力〜ひずみ曲線はすべて異っている。

この関係を $\theta_\zeta=0°$，90°，180° の場合につき，図12に示した等方圧密試料の場合と比較したのが，図16である。図中の破線で示した各曲線が等方圧密試料に対するものであり，実線で示したものが，ここに示した異方圧密試料に対するものである。同図 (a) の $\zeta\sim\gamma$ 曲線についてみると，三軸圧縮下で破壊に至る $\theta_\zeta=0°$ では，異方圧密試料の応力〜ひずみ曲線（実線）が，等方圧密試料のそれ（破線）より下に位置しており，初期接線勾配も小さくなっている。他方，三軸伸張下で破壊に至る $\theta_\zeta=180°$ の場合は，この傾向は逆になっている。$\theta_\zeta=0°$ 及び180°の応力状態は，それぞれ三軸圧縮及び伸張応力下でのせん断であり，図 9 (a) には，$\eta\sim\gamma$ 関係を示した。この図より，三軸圧縮下で異方圧密した試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) が三軸圧縮下で破壊に至る場合の $\eta\sim\gamma$ 曲線の初期接線勾配は，等方圧密試料 ($\eta^{i0}=0$) のそれより小さくなっている。逆に，三軸伸張下で破壊に至る場合は，等方圧密試料の初期接線勾配が，異方圧密試料のそれより小さくなっている。図16(a) は，この傾向を $\zeta\sim\gamma$ 関係で示したものである。同図中において，$\theta_\zeta=90°$ の場合の等方圧密試料（破線）の関係は，$\theta_\zeta=0°$の場合と180°の場合のほぼ中間的な傾向を示している。図16 (b) は，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係の比較を示している。$\theta_\zeta=0°$の場合（三軸圧縮状態）に着目すると，この場合，図 9 (b) から分かるように，最終の体積ひずみ v は，等方圧密試料の場合が異方圧密試料より大きくなっている。したがって，図16 (b) においても等方圧密試料の v

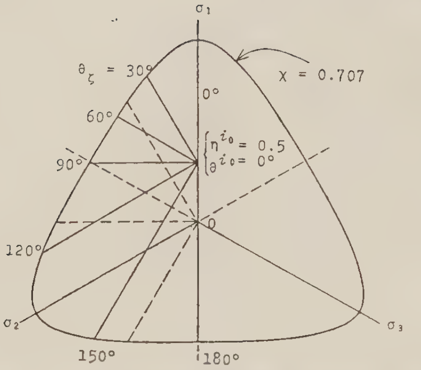
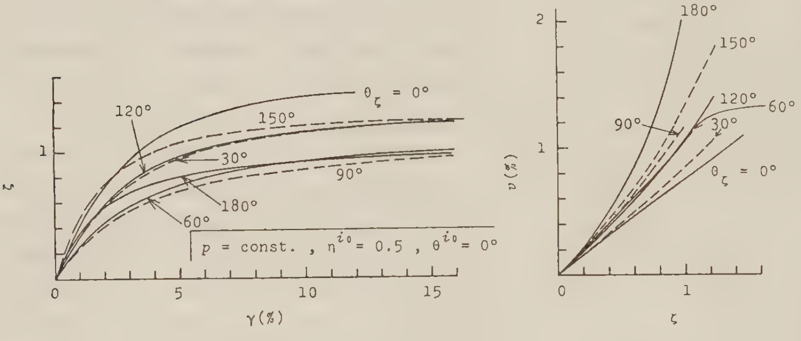


図 14　三軸圧縮下で異方圧密した試料のπ面上での応力経路

Stress paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) on the π-plane

〜θ曲線（破線）が異方圧密試料のもの（実線）より上に位置している。$\theta=180°$の場合（三軸伸張状態）は，同様に考えて，$\theta=0°$の場合と逆の傾向を示している。$\theta=90°$の場合は両者の中間の傾向を示している。

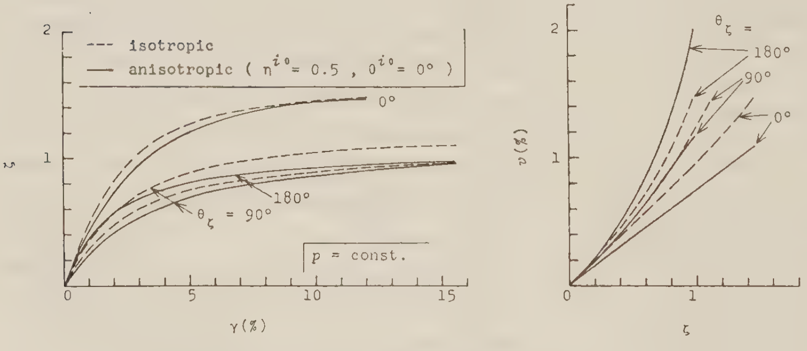
図17は，等方圧密試料（破線）と上に示した異方圧密試料（実線）のひずみ経路の比較をπ面上（図7参照）で原点を一致させて比較したものである。異方圧密試料ではせん断が三軸圧縮側のかなりせん断応力が作用している点（$\eta^{i0}=0.5$）から開始されており，図14に示したように，等方圧密試料の応力経路と比較して，同じθ_ζを持つ応力経路では，σ_1軸方向に偏って位置している。このため，π面でのひずみ経路も，異方圧密試料（実線）の方がϵ_1軸の正の方向に偏る傾向がみられる。また，等方圧密試料の場合，$\theta_\zeta=60°$と120°の場合のπ面上でのひずみ経路は直線となっているが，異方圧密試料の場合は，これよりϵ_1軸の正の側に偏った曲線となっている。これは，ここで用いた応力〜ひずみ理論において，塑性偏差ひずみ増分のせん断成分に対する塑性ポテンシャル$g_\zeta=0$の中心軸の応力比η^iがせん断の進行とともに静水圧軸方向に移動することによるものである。



(a)　(b)

図 15　異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$）の応力〜ひずみ関係
(a) ζ〜γ 関係　(b) v〜ζ 関係

Stress-strain relationship of anisotropic specimens
(a) ζ〜γ relationship, (b) v〜ζ relationship



(a)　(b)

図 16　等方圧密試料と異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$）の応力〜ひずみ関係の比較 (a) ζ〜γ 関係 (b) v〜ζ 関係

Comparison of stress-strain relationships between isotropic and anisotropic ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) specimens, (a) ζ〜γ relationships, (b) v〜ζ relationships

4.3.3 相異なる3主応力下で異方圧密した試料の応力〜ひずみ関係

ここでは，相異なる3主応力下で異方圧密を受けた試料に対して式（115）で計算される応力〜ひずみ関係の1例を示す。すなわち，$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$で，$p=2\mathrm{kgf/cm}^2$まで異方圧密された試料を，図18に示したように，$\theta_\zeta=0°$, 30°, 90°, 150°, 210°, 270°, 330°の直線の応力経路に沿って，平均主応力pを一定としてせん断する場合の計算結果を示す。

図19は，このときの各θ_ζ

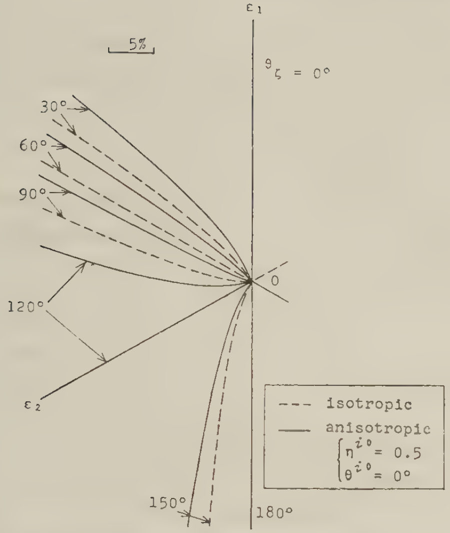


図 17　等方圧密試料と異方圧密試料($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) の π 面上でのひずみ経路の比較
Comparison of strain paths between isotropic and anisotropic ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) specimens on the π-plane

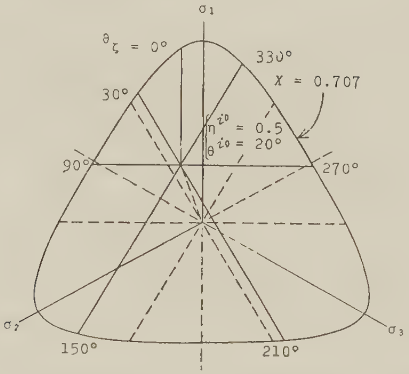


図 18　相異なる 3 主応力下で異方圧密された試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) の π 面上での応力経路
Stress paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) on the πplane

の応力経路に対する応力～ひずみ関係を示している。図 (a) は応力比 ζ と八面体せん断ひずみ γ の関係である。同図 (b) は，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係を示している。

図20は $\theta_\zeta=0°$, 90°, 210° の場合に対して，等方圧密試料（破線）と異方圧密試料（実線）の応力～ひずみ曲線の比較を行ったものである。等方圧密試料の場合，$\theta_\zeta=90°$ と210° の応力経路に対する応力～ひずみ曲線は同じになる。図(a)は，応力比 ζ と八面体せん断ひずみ γ との関係である。$\theta_\zeta=0°$ 及び90° では，等方圧密試料の応力～ひずみ曲線が，異方圧密試料のそれより上に位置しており，また，初期接線勾配も大きくなっている。これは，異方圧密終了時の応力状態 ($\eta^{i0}=1.5$, $\theta^{i0}=20°$) がこれらの応力経路の破壊時の応力点と静水圧軸に関してほぼ同じ側にあり，**4.3.2** で説明したように，三軸圧縮下で異方圧密を受けた試料が，三軸圧縮下で破壊する場合（図16 (a)の $\theta_\zeta=0°$ の曲線）に同様の傾向を示しているのと同じ理由によるものである。他方，$\theta_\zeta=210°$ の場合では，上の場合とは逆の傾向を示している。これは，この応力経路に対する破壊時の応力点が静水圧軸に関して，異方圧密時の応力点とは反対側に位置していることによるものである。図 (b) は体積ひずみ v と応力比 ζ の関係である。図中において，$\theta_\zeta=0°$, 90° の場合は，等方圧密試料の体積ひずみが，異方圧密試料のそれより大きくなっている。これは，対応する等方圧密試料のせん断時の応力経路の長さが，異方圧密試料のそれより長くなっており，体積ひずみは，θ_ζが同じであれば，ほぼ，その応力経路の長さに比例することによるものである。

図21は，図18に示した各θ_ζの応力経路に対する等方圧密試料及び異方圧密試料のひずみ経路を π 面上で示したものである。等方圧密試料のひずみ経路は，図13に示したものと同じである。図から分かるように，$\theta_\zeta=20°$ と

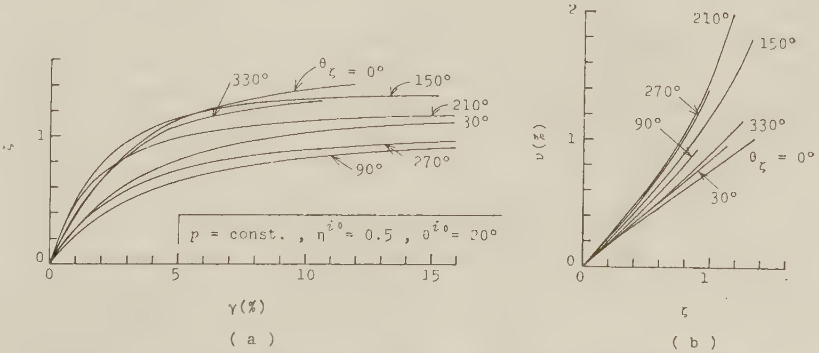


図 19　異方圧密試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) の応力～ひずみ関係
(a) ζ～γ 関係，(b) v～ζ 関係
Stress-strain relationship of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) (a) ζ～γ relationship, (b) v～ζ relationship

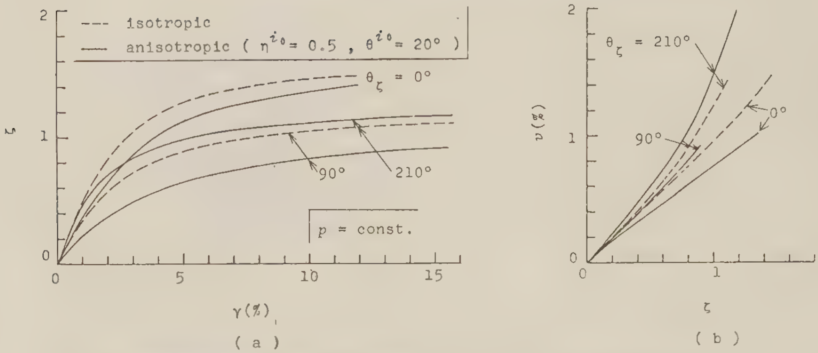


図 20　等方圧密試料と異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$）の応力～ひずみ関係の比較（a）ζ～γ 関係，（b）v～ζ 関係

Comparison of stress-strain relationships between isotropic and anisotropic ($\eta^{i0}=0.5, \theta^{i0}=20°$) specimens (a) ζ～γ relationships, (b) v～ζ relationships

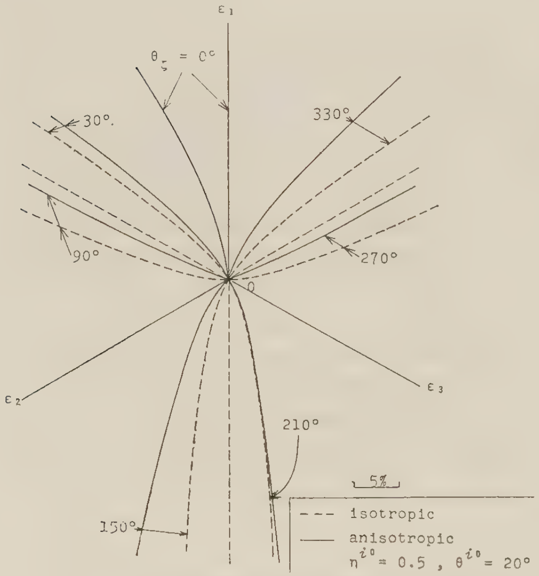


図 21　等方圧密試料と異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$）の π 面上でのひずみ経路の比較

Comparison of strain paths between isotropic and anisotropic ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) specimens on the π-plane

210°を境にして，両者の位置関係は逆の傾向を示している。すなわち，$\theta_\zeta=30°$，90°，150°では，異方圧密試料のひずみ経路が等方圧密試料のそれに比べ，時計回り方向にずれて位置し，$\theta_\zeta=270°$，330°，0°のひずみ経路では，反時計回り方向にずれて位置している。これは，異方圧密試料のせん断が，静水圧軸（π 面上での原点）より，$\theta=20°$の方向にずれてせん断応力（$\eta^{i0}=0.5$）を受けた状態から開始され，せん断の進行とともに，塑性ポテンシャル $q_\zeta=0$ の中心軸（$\eta=\eta^i$, $\theta=\theta^i$）が，その初期状態から静水圧軸方向に移動することによるものである。

4.4　一般応力下での応力～ひずみ関係

ここでは，式（115）を用いて，種々の応力ベクトルの偏角 θ_ζ の応力経路に沿って，応力比 ζ を増加しながら，同時に，平均主応力 p も増加する場合の応力～ひずみ関係の計算結果を示す。ここで扱うのは，応力比 ζ と平均主応力 p が同時に増加する場合であるから，計算の結果として求められるひずみは，式（115）の右辺第1項のせん断成分に加えて，圧密成分（第2項）及び弾性成分（第3項）が含まれることになる。実際の計算は，$p=7\text{kgf/cm}^2$ 前後まで行い，ここで打切った。

4.4.1　等方圧密試料の応力～ひずみ関係

ここでは，平均主応力 $p=2\text{kgf/cm}^2$ まで等方圧密した試料が，図22に示す応力経路に沿って圧密，せん断を受けるときの応力～ひずみ関係を示す。図22（a）は計算に用いた各応力経路を π 面上で示したものである。計算には，応力ベクトルの偏角 θ が 0°，30°，60°，90°，120°，150°，180° の場合の直線の応力経路を用いている。図（b）は，各応力経路を q～p 関係で示したものである。ここで用いた応力経路は，すべて，q～p 図上では，$dq/dp=1$ の直線で表わされるものとなっている。

図23には実線で，$\theta=0°$ の場合の体積ひずみ v と平均主応力 p の関係を片対数紙上に示している。また，同図中には，破線で圧縮指数 C_C を 0.244（$\lambda=0.106$）としたときの等方圧密時の v～$\log_{10}p$ 関係を示した。破線の関係は次の式から計算される。

$$v=\frac{C_C}{1+e_i}\log_{10}\frac{p^i+\Delta p}{p^i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(131)$$

ここに，$p^i=2\text{kgf/cm}^2$, $C_C=0.244$, $e_i=1.0105$ を用いている。破線で示される v～$\log_{10}p$ 関係は，式（131）より，直線関係であるが，実線で示される圧密，せん断時の v～$\log p$ 関係もほぼ直線関係となっている。図中の実線と破線で示される体積ひずみの差が，式（115）の塑性ひずみ増分のせん断成分より計算されるダイレタンシーである。なお，ここには示していないが，θ が 0°以外の応力経路に対する v～$\log_{10} p$ 関係も，ここに示した $\theta=$

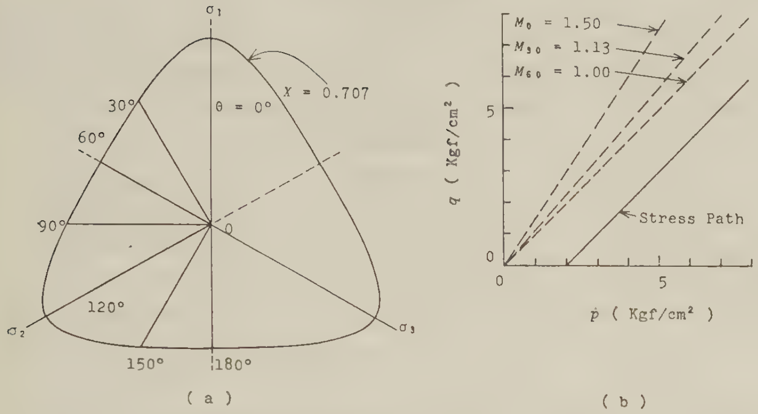


図 22　等方圧密試料の応力経路(a) π 面上での応力経路，(b) q～p 関係
Stress paths of isotropic specimens (a) Stress paths on the π-plane, (b) q～p relationship

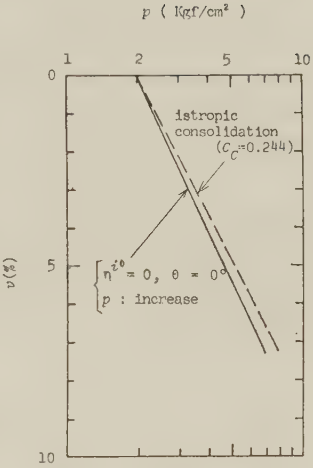


図 23　等方圧密試料のv～$\log_{10} p$ 関係
v～$\log_{10} p$ relationship of isotropic specimen

0°の場合と，ほとんど同じになっている。

図24は，図22で示した各応力経路に対する応力～ひずみ曲線の計算結果である。等方圧密試料であるので$\theta_\zeta=0°$，120°；30°，90°，150° 及び60°，180° はそれぞれ互いに同じ応力～ひずみ曲線を与える。図中には，平均主応力pを一定としてせん断する場合を破線で示し，ここで扱っている平均主応力pがせん断とともに増加する場合を実線で示している。同図(a)に，応力比ζと八面体せん断ひずみγの関係を示している。まず，実線で示される$\theta_\zeta=0°$（120° も同じ），30°（90°，150°），60°（180°）の場合をみると，θ_ζ が0° から60° に移るに従い，ζ～γ曲線の初期接線勾配は小さくなり，また，同じγでの応力比ζは小さくなる。これは，$\theta_\zeta=0°$，30°，60° の順に，図22(b)に示したように，応力比Mで示される強度が小さくなるためである。この傾向は，破線で示される平均主応力p一定応力下の場合も同じである。一方，同じθ_ζを持つp一定せん断時の ζ～γ 曲線（破線）とpが増加する場合のζ～γ曲線（実線）を比較すると，同じ応力比ζでは，後者の場合（実線）がかなり大きなγを示している。これは，後者の場合，pがせん断とともに増加するため，式(115)の右辺第1項のせん断成分の他に，第2項の圧密成分が加算されるためである。同図(b)は，体積ひずみvと応力比ζの関係である。平均主応力pが増加する場合（実線）は，$\theta_\zeta=0°$（120°）と60°（180°）の場合しか示していないが，$\theta_\zeta=30°$（90°，150°）の場合はこれらの中間に来る。破線で示される平均主応力一定下でのせん断の場合に比べ，pがせん断とともに増加する場合は，かなり大きい体積ひずみが発生する。これは，式(115)の第2項の塑性ひずみ増分の圧密成分及び弾性成分によるものである。

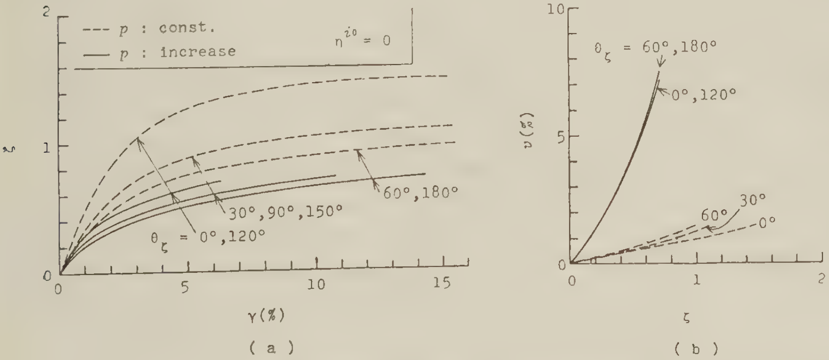


図 24　等方圧密試料の応力～ひずみ関係の比較
(a) ζ～γ 関係，(b) v～ζ 関係
Comparison of stress-strain relationships of isotropic specimens
(a) ζ～γ relationship, (b) v～ζ relationship

図25は，平均主応力pを一定としたせん断の場合（破線）とpが増加する場合（実線）の各θ_ζに対するひずみ経路のπ面上での比較である。$\theta_\zeta(=\theta)=0°$，60°，120°，180°の場合は，

等方圧密試料であるのでいずれのひずみ経路も π 面上で原点から放射状に伸びる直線となっている。一方，$\theta_{\zeta}=30^\circ$，90° の場合は，p 一定せん断時の破線で示されるひずみ経路に比べ，p が増加する場合の実線で示されるひずみ経路は，$\theta=60^\circ$ のひずみ経路から離れる方向にずれて位置している。これは図24 (a) でもみたように，同じ ζ では p が増加する場合のせん断ひずみは，p が一定の場合に比べ，大きい値を示すためであり，この影響が π 面上のひずみ経路に出ているものである。同図中には，両試験で同じ応力比 ζ（$=0.4$）に達したときのひずみの位置を黒丸印で示している。これによっても，同じ応力比に対応する π 面上でのひずみの位置は，p 一定せん断時に比べ，p が増加する場合は，塑性偏差ひずみの圧密成分による量だけ，原点より離れていることが分かる。

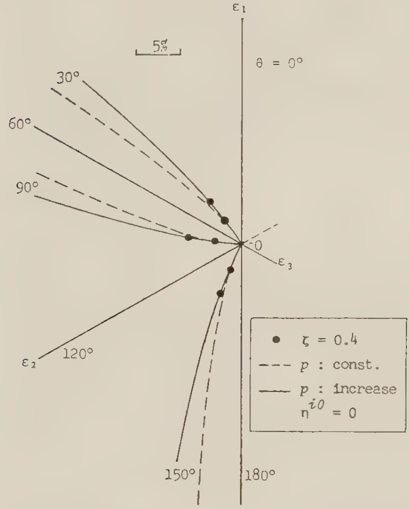


図 25　等方圧密試料の π 面上でのひずみ経路の比較
Comparison of strain paths of isotropic specimens on the π-plane

4.4.2　三軸圧縮下で異方圧密した試料の応力〜ひずみ関係

ここでは，三軸圧縮下で $p=2\mathrm{kgf/cm^2}$ まで異方圧密した試料（$p=2\mathrm{kgf/cm^2}$, $\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0^\circ$）を，図26に示す応力経路に沿って平均主応力 p を増加しながら，せん断する場合の応力〜ひずみ関係の計算結果を示す。計算に用いた応力経路は，図6 (a) に示した3主応力空間において，応力点 $(p, \eta, \theta)=(p^{i0}, \eta^{i0}, \theta^{i0})=(2, 0.5, 0^\circ)$ と $(p, \zeta)=(4, 0.5)$ で $\theta_{\zeta}=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ の各応力点を結ぶ直線を用いている。この応力経路を q〜p 図上で示すと，図(b)のようになり，一部は曲線となる。

図27は，上に示した各応力経路に対する応力〜ひずみ曲線の計算結果である。図 (a) には，応力比 ζ と八面体せん断ひずみ γ の関係を，図 (b) には，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係を示している。

これらの関係を，$\theta_{\zeta}=0^\circ$，90°，180° の場合について平均主応力 p を一定としてせん断する場合の応力〜ひずみ曲線（図15）と比較すると，図28のようになる。同図 (a) より，$\theta_{\zeta}=180^\circ$ の初期部分を除いて，いずれも，p が増加する場合の ζ〜γ 曲線（実線）が，p 一定せん断時の ζ〜γ の曲線（破線）より，同じ応力比 ζ に対しては大きい γ を示している。これは，図24 (a) に示した等方圧密試料の場合と同様，前者は，後者に比べ，塑性ひずみ増分のせん断成分の他に圧密成分が加算されたことによるものである。同図 (b) には，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係を示している。図24 (b) に示した等方圧密試料に対する場合と同様，この場合も，塑性ひずみ増分のせん断成分（ダイレタンシー）に，圧密成分及び弾性成分が加わることにより，p 一定応力下でせん断する場合の v（破線）より大きい値を与えている。

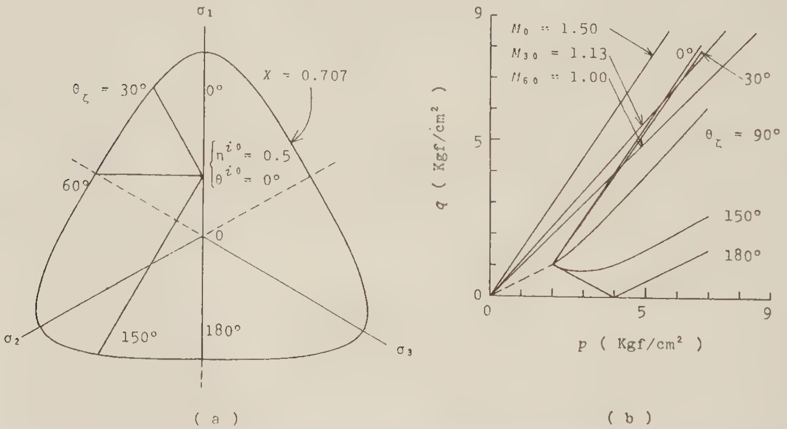
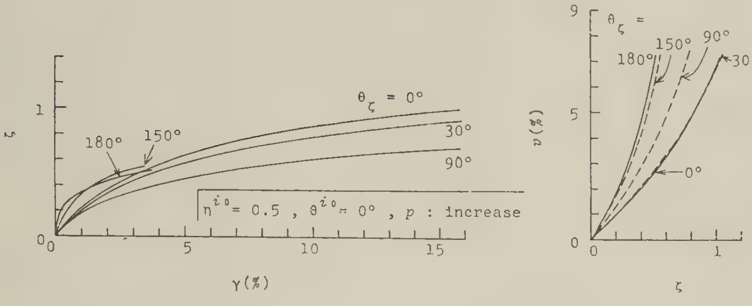


図 26　三軸圧縮下で異方圧密した試料の応力経路 (a) π 面上で応力経路，(b) q〜p 関係
Stress paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0^\circ$)
(a) Stress paths on the π-plane, (b) q〜p relationship

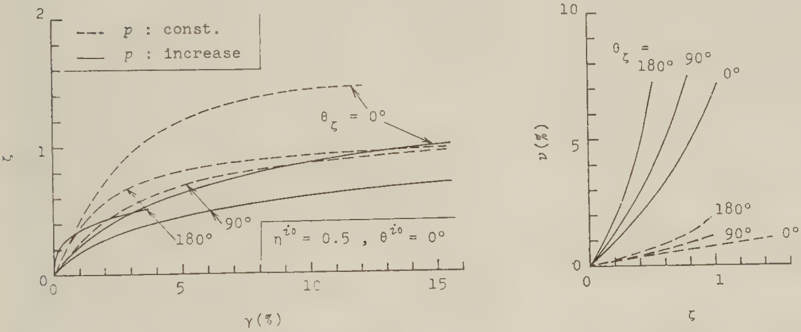
図29は，p 一定応力下の場合（破線）と p が増加しながらせん断する場合（実



(a)　(b)

図 27　異方圧密試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) の応力～ひずみ関係
(a) ζ～γ 関係，(b) v～ζ 関係

Stress-strain relationship of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) (a) ζ～γ relationship, (b) v～ζ relationship



(a)　(b)

図 28　異方圧密試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) の応力～ひずみ関係の比較
(a) ζ～γ 関係，(b) v～η 関係

Comparison of stress-strain relationships of anisotropic specimens (a) ζ～γ relationships, (b) v～ζ relationships

線）のひずみ経路をπ面上に示したものである。破線で示されるp一定応力下でのひずみ経路は，図17で実線で示したものと同じである。図から分かるように，pを増加しながらせん断していく場合のひずみ経路(実線)は，同じθ_ζを持つp一定応力下でせん断する場合のひずみ経路（破線）に比べ，いずれも，時計回り方向にずれて位置している。これは，等方圧密試料の場合（図25）に説明したように，前者の場合は，後者の場合と比べ，塑性ひずみ増分のせん断成分の他に圧密成分が加わることと，これらの両成分に対する塑性ポテンシャルの中心軸($\eta=\eta^i$, $\theta=\theta^i$)が，等方応力状態（静水圧軸）でなくて，これより，三軸圧縮側に偏っていることによるものである。同図中には，黒丸印で両ひずみ経路上に，ζが0.4に達したときのひずみ点を示している。同じθ_ζを持つひずみ経路では，pを増加しながらせん断する場合が，原点（静水圧軸）より離れて位置し，大きいせん断ひずみγが生じていることが分る。

4.4.3 相異なる3主応力下で異方圧密した試料の応力～ひずみ関係

ここでは，相異なる3主応力下で異方圧密を受けた試料に対して，式(115)で計算される応力～ひずみ関係の1例を示す。すなわち，$\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$で，$p=2\mathrm{kgf/cm^2}$まで異方圧密した試料を図30に示した応力経路に沿って，せん断，圧密するときの計算結果を示す。応力経路は，3主応力空間において，応力点$(p, \eta, \theta)=(p^{i0}, \eta^{i0}, \theta^{i0})=(2, 0.5, 20°)$と，$(p, \zeta)=(4, 0.5)$で，$\theta_\zeta=0°$，

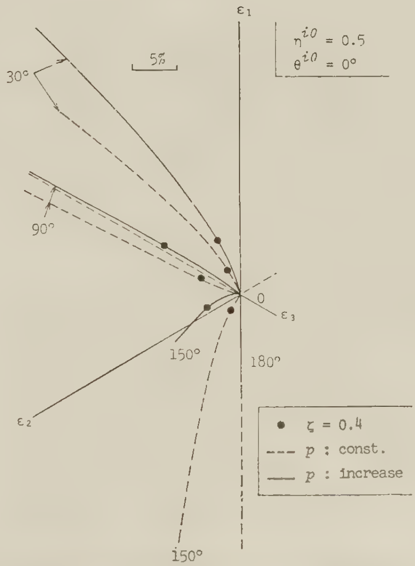


図 29　異方圧密試料 ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) の π 面上でのひずみ経路の比較

Comparison of strain paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=0°$) on the π-plane

30°，90°，150°，210°，270°，330° の各応力点を結ぶ直線を用いている。同図 (b) は，各応力経路を q～p 関係で示したものである。この場合の応力経路も一部曲線となっている。

図31は，上に示した各応力経路に対する応力～ひずみ関係である。同図 (a) は，応力比 ζ と八面体せん断ひずみ γ の関係を示している。同図 (b) は，体積ひずみ v と応力比 ζ との関係である。

これらの関係のうち，$\theta_\zeta=0°$，90°，180° の場合につき，図19で示される平均主応力 p 一定下でせん断した場合の応力～ひずみ関係と比較したのが，図32である。同図 (a) をみると，$\theta_\zeta=210°$ の初期部分を除くと，いずれも p が増加する応力経路の場合のせん断ひずみ（実線）が，同じ応力比 ζ で比較すると，対応する破線で示される p 一定応力下でのせん断ひずみよりも大きくなっている。これは，上に述べた場合と同様，前者は後者の塑性偏差ひずみ増分のせん断成分に加え，圧密成分が加算されることによるものである。図 (b) は，体積ひずみ v と応力比 ζ の関係の比較である。この場合も塑性偏差ひずみ増分の圧密成分及び弾性成分の加算されている p を増加させる応力経路に沿う場合の体積ひずみ（実線）が，p 一定下でせん断される場合の体積ひずみ（破線）より，大きくなっている。

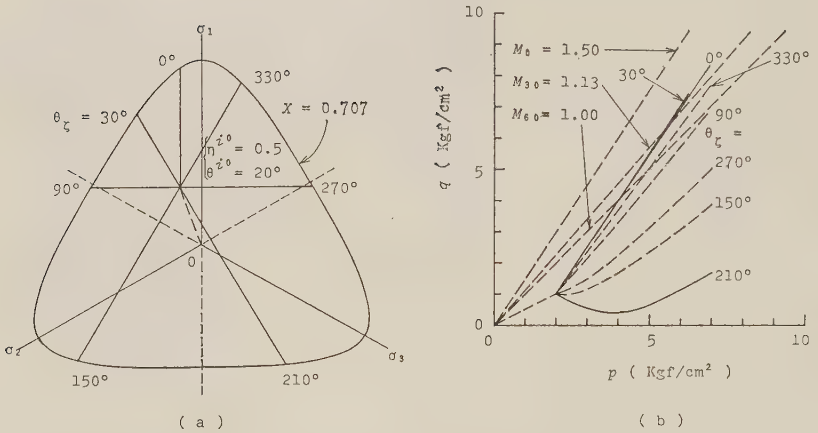


図 30　相異なる3主応力下で異方圧密した試料（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=20°$）の応力経路　(a) π 面上での応力経路，(b) q～p 関係

Stress paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) (a) Stress paths on the π-plane, (b) q～p relationship

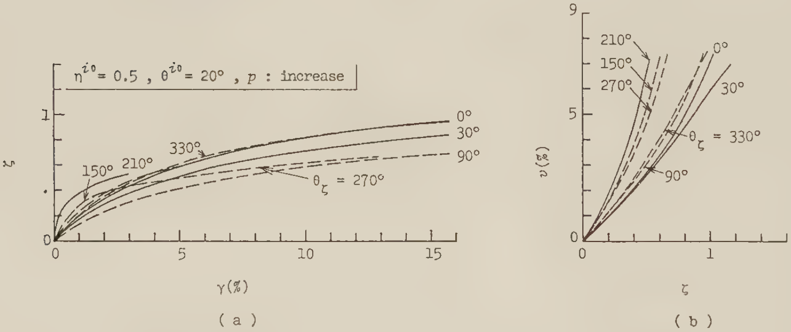


図 31　異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=20°$）の応力～ひずみ関係　(a) ζ～γ 関係，(b) v～ζ 関係

Stress-strain relationship of anisotropic specimens (a) ζ～γ relationship, (b) v～ζ relationship

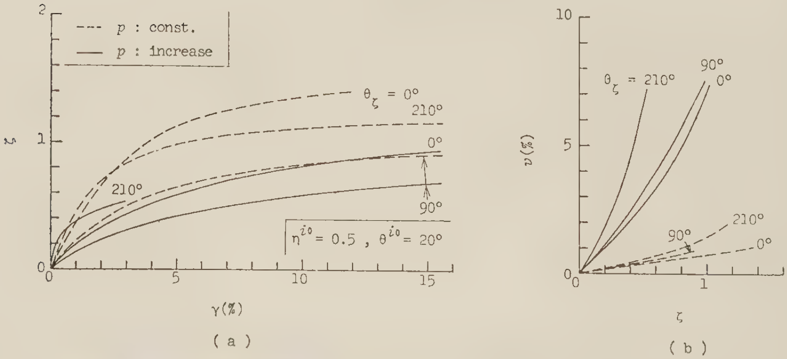


図 32　異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=20°$）の応力～ひずみ関係の比較　(a) ζ～γ 関係，(b) v～ζ 関係

Comparison of stress-strain relationships of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5$, $\theta^{i0}=20°$) (a) ζ～γ relationships, (b) v～ζ relationships

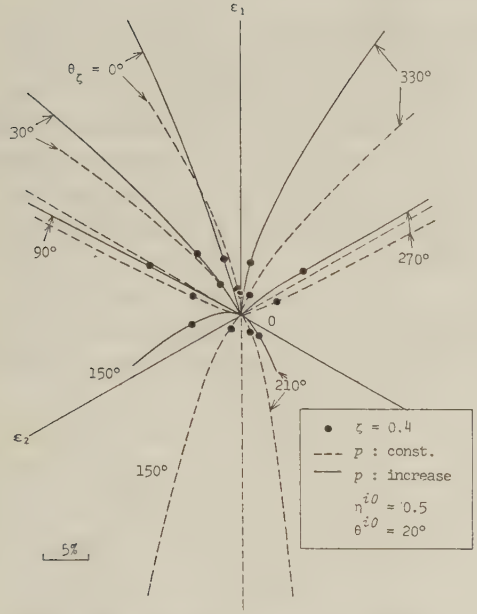


図 33　異方圧密試料（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=20°$）の π 面上でのひずみ経路の比較

Comparison of strain paths of anisotropic specimens ($\eta^{i0}=0.5, \theta^{i0}=20°$) on the π-plane

図33は，平均主応力 p が増加する場合の各応力経路に対するひずみ経路（実線）と p が一定の場合のひずみ経路（破線）を π 面上で比較したものである。$\theta_\zeta=0°$ では，両ひずみ経路は交叉しているが，$\theta_\zeta=30°$，90°，150°では時計回り方向に，$\theta_\zeta=210°$，270°，330°では反時計回り方向に，それぞれ，前者のひずみ経路（実線）は，後者のそれに比べ，ずれて位置している。これは，図29の場合と同じ理由による。同図中には，黒丸印で，ζが，0.4に達したときのひずみ点の位置を示している。図から分かるように，せん断中 p が増加する場合が，p 一定の場合に比べ，より原点より離れて位置しており，大きなせん断ひずみが生じていることを示している。

5.　結　　論

本論文において，種々の応力比で異方圧密された土の三軸試験より得られた軸対称条件下での応力～ひずみ関係を基礎にして，これを弾塑性理論を用いることにより，3次元的な応力条件下の関係に一般化した。一般化は，異方圧密時の場合と，一般応力経路に沿って圧密，せん断する場合の2つの場合に分けて行った。

異方圧密時の土の応力～ひずみ関係の一般化は次の仮定に基づいて行った。

1）土の破壊基準として，松岡，中井[9]による基準を用いる。

2）応力パラメーターとして，三軸圧縮下で用いられている M_C，η_C を一般応力下では，式(16)で定義される M 及び式(2)で定義される η に置き換える。

3）ひずみ増分を体積ひずみ増分と偏差ひずみ増分に分けて一般化する。体積ひずみ増分は，弾性成分と塑性成分に分けるが，前者は軸対称条件上の場合と同様の形（式(79)の第1式）で表わし，後者は，偏差ひずみ増分の大きさを式(89)の第2式のように一般化する。これに対する塑性ポテンシャルは，松岡，中井[9]の空間滑動面の概念から導いた式(15)を用い，これより，計算される正規化された偏差テンソル（式(35)）を用いて，式(90)のように一般化する。

4）このときの土の降伏関数は式(92)のように与えられる。

これらの仮定を用いて得られた異方圧密時の応力～ひずみ関係式は，式(117)，(118)のように一般化される。

つぎに，一般応力下での土の応力～ひずみ関係を求めるために，次の仮定を用いた。

1）土の破壊基準としては，松岡，中井[9]による基準を用いる。

2）ひずみ増分は，弾性成分と塑性成分に分ける。

3）ひずみ増分の弾性成分に関しては，そのせん断成分は無視し，式(79)で表わされる圧密成分のみとする。

4）ひずみ増分の塑性成分は，これをせん断成分と圧密成分に分ける。

5）塑性ひずみ増分のせん断成分は，これを体積ひずみ成分と偏差ひずみ成分に分けて一般化を行う。体積ひずみ成分の一般化においては，軸対称条件下で得られた関係式において，$d\eta_C$ を dx_ζ に置き換えることにより一般化する。また，偏差ひずみ増分については，軸対称条件下で得られた関係式において，M_C，η_C，$d\eta_C$ をそれぞれ，M，η，$a\cdot dx_\zeta$ に置き換えることにより一般化する。この際，この塑性ひずみ増分に対する塑性ポテンシャルとして，式(30)において，$\mu\equiv\zeta$ としたものを用いる。この塑性ポテンシャルは，せん断の進行とともに，その中心軸（η^i, θ^i）を中心にして拡大していくとともに，この中心軸自体が図4に示したように静水圧軸方向に移動するもとしている。この塑性ひずみ増分に対する降伏関数は式(102)で表わされるものとする。

6）塑性ひずみ増分の圧密成分は，これを体積ひずみ成分と偏差ひずみ成分に分けて，一般化を行う。体積ひずみ成分の一般化においては，式(104)の第1式に示したように，軸対称応力下で得られたのと同じ形を用いる。また，偏差ひずみ増分については，軸対称応力下で

得られた関係式(83)において，$M_{\xi C}$，ξ_C を M_ξ，ξ に置き換えることにより一般化する。この際，この塑性ひずみ増分に対する塑性ポテンシャルとして，式(30)において，$\mu\equiv\xi$ としたものを用いる。この塑性ポテンシャルはせん断の進行とともに拡大または収縮するが，その中心軸（η^0，θ^0）は，塑性ひずみ増分のせん断成分に対する塑性ポテンシャルの中心軸（η^i, θ^i）の関数として応力空間を移動する。この塑性ひずみ増分に対する降伏関数は，式(111)で表わされるものとする。

以上の仮定のもとに，一般応力下での異方圧密粘性土の応力～ひずみ関係として，式(115)，(116)が得られた。この関係式を用いて，種々の応力経路に対して，数値計算を行い，応力～ひずみ関係を求めた。これらの計算結果より，ここに提案した異方圧密粘性土の応力～ひずみ関係式の特性として，次の各点が挙げられる。

1)　三軸試験を対象とした軸対称応力下での応力～ひずみ関係の計算結果より，ここに示した応力～ひずみ関係式は，種々の応力比で異方圧密された土試料の三軸圧縮下及び伸張下での平均主応力を一定とするとき，及び，それを増加する場合の応力～ひずみ関係の実験結果をほぼ説明する。

2)　等方圧密試料を，種々の偏角 θ を持つ応力経路に沿ってせん断する場合の応力～ひずみ関係の計算結果より，この応力～ひずみ関係式は次の特性を持つ。すなわち，平均主応力一定でせん断する場合，π 面上に投影したひずみ経路において，3主応力が相異る応力経路（$\theta=30°$，90°，150°など）の場合，ひずみ経路は，三軸伸張下でのひずみ経路（$\Theta=60°$，180°）の方向に次第にずれる(13図参照)。これは何人かの研究者[12,13,14]により確かめられた傾向に一致する。また，等方圧密試料で同じ θ を持つ応力経路に沿って p を増加しながらせん断するときのひずみは，p 一定の場合に比べ，その圧密成分だけ大きいひずみを与える。相異る3主応力下（$\theta=30°$，90°，150°）でせん断する場合，これをひずみの π 面上で比較すると，p 一定下でせん断する場合のひずみ経路に比べ，三軸伸張下（$\theta=60°$，120°）のひずみ経路から離れる傾向がある（図25参照）。

3)　三軸圧縮下（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=0°$）及び相異なる3主応力下（$\eta^{i0}=0.5$，$\theta^{i0}=20°$）で異方圧密を受けた試料を，平均主応力を一定として，各 θ_ζ を持つ応力経路に沿ってせん断する場合の計算結果より，このときの各応力経路に対するせん断ひずみの π 面上での経路は，同じ θ_ζ を持つ等方圧密試料のそれに比べ，異方圧密を受けた応力点の方向にずれる（図17，21参照）。これは，両者の応力経路の位置の相異とともに，異方圧密を受けた試料では，せん断中に塑性ポテンシャルの中心が静水圧軸方向に移動することによるものである。

4)　上に述べた異方圧密試料の平均主応力 p を増加しながら，せん断する場合の応力～ひずみ関係の計算結果より，このときの π 面上でのひずみ経路は，同じ θ_ζ を持つ応力路に沿って，p を一定としてせん断する場合のそれに比べ，異方圧密時の応力点の方向にずれる（図29，33参照）。

5)　平均主応力を増加する場合の体積ひずみ v と $\log p$ の関係では，ここに扱った θ_ζ を一定としてせん断，圧密する応力経路では，θ_ζ の相違による影響は，等方圧密試料，異方圧密試料ともにほとんどみられない。

以上，種々の応力経路に対して得られた応力～ひずみ関係の計算結果より，この応力～ひずみ関係式の特性について述べた。これらの特性のうち，1)，2)で述べた応力経路については，何人かの研究者により実験がなされており，これとほぼ同様の特性を示すことが分った。しかし，3)～5)については，今後さらに実験的に確めていく必要があると思われる。

参考文献

1) Calladine, C.R.: A microstructural view of the mechanical properties of saturated clay, Geotech. Vol. 21, No. 4, pp. 391～415, 1971.

2) 太田秀樹・畠昭治郎：異方圧密粘土の状態曲面について，土木学会論文報告集，第196号，pp.117～124，1972

3) Pender, M. J. : A unified model for soil stress-strain behaviour, Proc. Specialty Session 9, 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., pp. 213～222，1977

4) 関口秀雄，太田秀樹：Induced anisotropy and time dependency in clays, Specialty Session 9, 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., pp. 229～238，1977

5) Prevost, J.-H.: Anisotropic undrained stress-strain behavior of clays, Proc. ASCE, Vol. 104, No. GT 8, pp.1075～1090，1978

6) Mroz, Z., V. A. Norris and O. C. Zienkiewicz: Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils, Geotech. Vol. 29, No.1, pp. 1～34，1979

7) 龍岡文夫：Stress-strain behavior of idealized anisotropic granular material，土質工学会論文報告集，第20巻，第3号，pp.75～90，1980

8) 松岡元，中井照夫，石崎仁：複合滑動面に基づいた異方性土の応力・ひずみ関係，土木学会論文報告集，第300号，pp.57～67，1980

9) 松岡 元，中井 照夫： Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stress，土木学会論文報告集，No.232，pp.59～70，1974

10) 大槙正紀：異方正規圧密粘性土の変形特性，水産工学研究所報告，第2号，pp. 33～46，1981

11) 大槙正紀：正規圧密粘性土の変形特性に及す応力経路履歴の影響，土木学会論文報告集，等316号，pp. 97～109，1981

12) Yong, R. N. and E. McKyes : Yield and failure of a clay under triaxial stresses, Proc. ASCE, Vol. 97, No. SMl, pp.159～176，1971

13) Lade, P. V. and J. M. Duncan : Stress-path dependent behavior of cohesionless soil, Proc. ASCE, Vol. 102, No. GTl, pp.51～68，1976

14) 宮森建樹：多軸応力状態における砂のせん断強さと変形特性，土木学会論文報告集，No.255，pp.81～92，1972

A Stress-strain Relationship of Anisotropically, Normally Consolidated Cohesive Soil under General Stress Condition

by

Seiki OHMAKI

Summary

In this paper, a relationship between stress and strain for anisotropically, normally consolidated cohesive soil is proposed. The relationship obtained is based on the experimental results of stress-strain behaviour of anisotropically consolidated cohesive soil under triaxial compression and extension shown by the Author (1981). The relationship between stress and strain under axisymmetric stress condition obtained above is generalized based on the following assumptions. That is, 1) the failure criterion of soil by Matsuoka and Nakai (1974) is used.2) The mean effective stress, p, shearing stress, q, and cos 3θ (θ is the amplitude of stress vector in effective stress space) are used as the fundamental parameters in the expression of the stress-strain relationship of soil. In order to take into account of the effect of anisotropic consolidation on soil specimen, the deviatoric stress ratio tensor introduced by Sekiguchi and Ohta (1977) is used and stress parameters, q, and cos 3θ, expressed by this tensor are used. 3) The strain increment is divided into the elastic and plastic components. The plastic component is furthermore divided into shearing and consolidation components. Corresponding to these two components of the plastic strain increment, two plastic potentials are introduced which are obtained from the stress ratio on the spacial mobilized plane by Matsuoka and Nakai (1974). It is assumed that the axes of these plastic potentials move from their initial stress state towards the hydrostatic state in the stress space during shear.

The elasto-plastic stress-strain relationship of soil with the induced anisotropy is obtained under general stress condition, in which the nonassociated flow rule with two plastic potentials is formulated. Using this stress-strain relationship of soil, deformation behaviour for various stress paths are calculated and validity of the present theory is verified. It is shown that the stress-strain relationship of soil proposed here has the following characteristics. 1) This relationship explains well the experimental results carried out along various stress paths under triaxial compression and extension. 2) The stress-strain relationship for isotropically consolidated soil along various stress paths in three principal effective stress space shows the same tendency as

the experimental results presented by some researchers. 3) From the calculated results of stress-strain relationship of soil which is anisotropically consolidated under triaxial compression or three different effective stress condition, the following characteristics are shown. That is, when soil is sheared under constant mean effective stress, the strain paths of soil on the π-plane show the effect of anisotropic consolidation compared with the behaviour of isotropically consolidated soil. When the soil is sheared while increasing mean effective stress, larger shear and volumetric strains are induced than those for soil which is sheared along the corresponding constant mean effective stress path. This is due to the consolidation component of plastic strain increment.

水工研報告　3
1982 pp.173～186

漁船機関における乳化燃料の使用について— I

—乳化燃料使用時の機関の運転性能—

小田健一*・山田敏夫*

目　　次

1.　まえがき……………………………………………… 173
2.　供試燃料……………………………………………… 174
  2.1　乳化燃料 ………………………………………… 174
  2.2　乳化燃料の製造 ………………………………… 174
  2.3　乳化燃料の安定性 ……………………………… 174
3.　供試機関……………………………………………… 175
4.　実験方法……………………………………………… 175
5.　水分添加率の影響…………………………………… 175
  5.1　燃料消費率 ……………………………………… 176
  5.2　排気温度 ………………………………………… 176
  5.3　排煙濃度 ………………………………………… 176
  5.4　排気ガス分析 …………………………………… 177
  5.5　着火遅れ ………………………………………… 179
  5.6　燃焼室内最高圧力 ……………………………… 179
  5.7　考　察 …………………………………………… 179
6.　燃料噴射位置の影響………………………………… 181
  6.1　燃料消費率 ……………………………………… 181
  6.2　排気温度 ………………………………………… 181
  6.3　排煙濃度 ………………………………………… 181
  6.4　着火遅れ ………………………………………… 181
  6.5　燃焼室内最高圧力 ……………………………… 183
  6.6　考　察 …………………………………………… 184
7.　まとめ………………………………………………… 184
8.　あとがき……………………………………………… 184
  Summary ……………………………………………… 186

1.　まえがき

最近の石油製品価格の高騰により，漁業経営に占める漁船の燃料費の割合が増大し¹⁾，経営を圧迫する主たる要因となっている。これに対応するため，漁船機関においても価格が安く供給も比較的安定しているC重油が注目され，これに従来から使用されているA重油を混合してB重油相当の燃料を作製し，機関に供給する方法が考えられており，工場における実験や²⁾漁船建造時のモデルプランの検討³⁾を経て，一部の漁船で実用化⁴⁾されている。

我々は以前に小形漁船機関を使用して，B重油相当のA/Cブレンド油を使用した場合の機関の運転性能および耐久性を，軽油，A重油と対比して検討したが⁵⁾，小形機関にB重油相当の燃料を使用した場合には，燃費率の増加と各部の摩耗や汚れの増加によるメンテナンス間隔の短縮が避けられないとの結論を得た。

B重油をはじめとする低質燃料の燃焼改善をはかり熱効率の低下を防ぐ方法の一つに，燃料に水を加えて乳化させ，添加された水の持つ物理的，化学的な作用の助けを借りて良好な燃焼状態を得る方法がある。乳化燃料は，すでに陸用ボイラでは，排気ガス中のばいじんや窒素酸化物の低減，低余剰空気燃焼による排気損失の低減など，公害防止と省燃費のための有効な手段として実用化されており⁶⁾，ボイラの汚れも低減することから，タンカーの船用ボイラでも乳化燃料使用の実船試験が行なわれている⁷⁾。

ディーゼル機関では，ボイラの様な低余剰空気燃焼による省エネは困難であり，また燃料系統をはじめとして多くの摺動部分を有するため水による悪影響を受ける恐れも多く，乳化燃料に起因するプランジャの焼付事故の例⁸⁾も報告されている。しかし，乳化燃料は排気ガス中の窒素酸化物濃度の低減と燃費率の改善を同時に達成できる数少ない方法の一つとして期待されている。

ここでは低質燃料の焼焼改善方法の一つとして，従来あまり検討されていない予燃焼室タイプの小形漁船機関における乳化燃料の使用を検討することとし，乳化B重油が機関の運転性能に及ぼす影響を調査するとともに，比較のために乳化軽油についても同様のデータをとることにした。

---

* 漁船工学部

2.　供試燃料

2.1　乳化燃料

乳化燃料とは，各種液体燃料に水を加えエマルジョン状にしたもので，燃料が連続相となってその中に水が分散している油中水滴形と，逆に水の中に油が分散している水中油滴形がある9)。ディーゼル機関の燃料として使用する場合には，流動性，防錆性，着火性のいずれもが前者が優れていると考えられるので，ここでは油中水滴形を採用した。

2.2　乳化燃料の製造

乳化燃料の製造方法には，凝縮法，分散法，断続振とう法，ミキサ，コロイドミル，ホモジナイザなど種々の方法がある9)が，ここでは最も簡単なミキサを採用した。

供試燃料は，ベースに市販の軽油とB重油を使用した。それぞれの一般性状を表1に示す。燃料の乳化は，これらの軽油またはB重油に乳化剤を1 wt％加え攪拌した後，規定量の水を加えよく攪拌することで行なった。水分添加率は乳化燃料全体に占める水の割合が0から50 wt％まで10wt％毎に6段階に選んだ。こうして作製した乳化燃料の顕微鏡写真の一例を図1に示す。図中の丸いのが水の粒子で，その直径は1～10μmに分布している。

表1　供試燃料の一般性状
Specification of fuel oil for tests

分析項目	軽油	B重油
比重 15/4℃	0.8361	0.9182
反応	中性	中性
引火点 ℃	95	79
粘度 @30℃ cSt	4.19	72.4
@50℃ cSt	2.68	27.9
流動点 ℃	−10.0	7.5
イオウ分 wt％	0.57	1.96
残留炭素分 wt％	0.12*	6.30
水分 vol％	0.02	0.04
セタン指数	55	47
真発熱量 kcal/kg	10,280	9,930
蒸留試験 ℃		
初留点	207	131
50％点	277	364
90％点	329	—
95％点	346	—

* 軽油は10％残油の残留炭素分

2.3　乳化燃料の安定性

乳化燃料は互いに溶解しない水と油を強制的に分散させたもので，その存在は不安定なものである。乳化燃料の不安定性には，〝破壊〟と〝クリーミング〟それに〝凝結〟がある9)。破壊とは，水の小さな液滴が結合して大きな液滴となり，最終的には二液層に分離する現象をいい，軽油と水のエマルジョンは乳化剤を使用しなければ短時間で破壊を生じる。クリーミングは，分散している水の液滴が重力の作用で沈降し底にたまるが，粒子は互いに接触しても合一しないで隔てられたままでいる現象である。凝結は，個々の液滴が合一することなく三次元的な液滴集合体を形成して，液滴が互いに付着する現象である9)。

ディーゼル機関に供給する乳化燃料が短時間で破壊を生じた場合，機関の燃料に水が供給される危険性があり，また燃料サービスタンク内でクリーミングを生じた場合には，作製した乳化燃料と大幅に水分添加率の異った燃料が供給される可能性がある。そこで作製した乳化燃料をメスシリンダに採取し，静止した状態で一定時間毎に目視による観察（B重油は判断が困難なため軽油のみ）と簡易水分験試器による分析により，変化状況を調査した。結果を図2，表2に示す。

乳化軽油の場合は時間の経過とともにクリーミングを生じ，この部分の水分含有率は約50％となり上層部には水分はほとんど存在しなくなる。一方乳化B重油では時間の経過とともに底部の水分含有率に増加傾向がみられるが，水分は全体に分散して存在しており安定したエマルジョンが得られる。ただし，顕微鏡による観察によると凝結を生じていることが判明した。

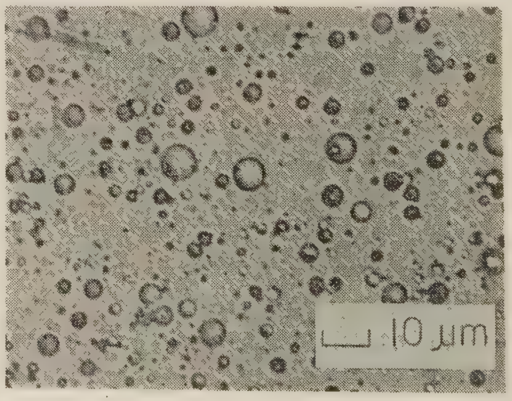


図1　乳化燃料
Emulsified fuel

表 2　乳化燃料の安定性

Changing of oil/water ratio in emulsified fuel　単位 vol%

経過時間 h サンプリング部分 供試燃料	1			5			24		
	表面	中央	底	表面	中央	底	表面	中央	底
軽油　水分添加率　10wt%	0.5	5.8	41.8	0.5	0.3	42.4	0.2	0.2	48.5
軽油　水分添加率　20wt%	0.4	12.2	42.3	0.3	14.0	49.6	0.0	0.2	50.9
B重油　水分添加率　10wt%	5.9	6.1	5.5	6.3	6.1	6.2	6.2	5.7	6.3
B重油　水分添加率　30wt%	24.9	28.0	31.7	27.7	23.5	32.1	25.6	28.9	36.4

軽油とB重油におけるこれらの差異は，両者の比重，粘度差とB重油中のアスファルテンの持つ乳化力の違いにより生じたものと思われる。

3.　供試機関

供試機関には，三菱重工業ダイヤディーゼル1 DVA－8 a型，4サイクル立型単気筒予燃焼室式を使用した。機関の主要目を表3に示す。舶用機関の呼称区分10)では小形〔I〕低速機関に該当する。

4.　実験方法

軽油，B重油それぞれにつき水分添加率を6段階，合計12種類の燃料に対して，負荷を標準出力の8 PS{5.89 kW} に対し舶用特性で25，50，75，100，110%にとり運転を行なった。機関を軽油で始動後，10分間でゆっくりと標準出力まで上げ，1時間程度運転して各部の温度が一定となったところで供試燃料に切り替え，規定の負荷に合わせて10分程度運転し，各々のデータが安定したところで測定を開始した。測定終了後の機関の停止時には，燃料を軽油に切り替えた。

冷却水出口温度は65℃に，潤滑油温度は60℃に負荷にかかわらず一定に制御した。

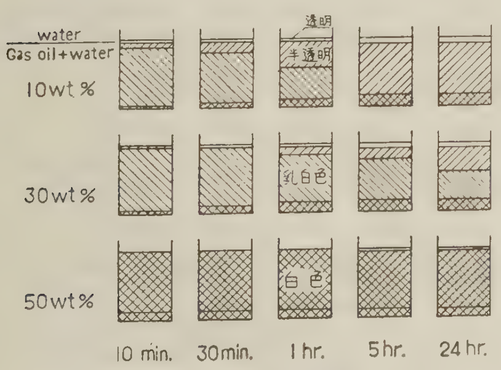


図 2　乳化軽油の安定性

Creaming in gasoil/water emulsion

供試機関の燃料噴射位置は，上死点前 10～12 deg. が標準なので10deg.一定で試験をし，これとは別に50%と100%負荷について噴射位置を2.5deg.ずつ早めて，17.5 deg.までデータをとった。

測定項目および使用計測器は次の通りである。

燃料消費量には歯車式微小流量計を使用した。各部の温度には熱電対を用い，一部にアルコール棒状温度計を併用した。燃料室内圧力にはひずみゲージ式圧力変換器とシンクロスコープを用いた。排気ガス濃度には反射式スモークメータを用いた。排気ガス分析は自動車用排ガス総合分析装置を使用した。

実験は夏期に行なったため，燃料の加熱は行なわなかった。このときの燃料のノズル入口における温度は約50℃であった。なお，燃料系統のこし器は水の分離を防ぐため，ノズル入口のストレーナ以外は全て撤去した。

5.　水分添加率の影響

燃料噴射位置を 10deg.B.T.D.C.一定とし，負荷をパラメータにとって，各水分添加率による機関性能の変化を以下に示す。負荷と図中の記号の関係は表の通りである。

表 3　供試機関の主要目

Test engine

形式	三菱重工業ダイヤディーゼル 1 DVA-8a
シリンダ数	1
シリンダ径	110mm
行程	150mm
回転数	900r.p.m.
出力	8PS{5.89kW}
ピストン速度	4.5m/s
平均有効圧力	5.61kgf/cm²{549kPa}
燃焼室形式	予燃焼室

表 4　負荷と図中の記号
Load and mark

負荷 Load	110%	100%	75%	50%	25%
記号 Mark	○	△	□	▽	◇

5.1　燃料消費率

燃料消費率は，添加した水分量を差し引き燃料のみに対する値として求めた。従って，水の蒸発潜熱による燃料の発熱量の低下は考慮していない。

軽油の場合，図3のように水分添加率の増加とともに燃料消費率は低下するが，低負荷では10～20wt%，高負荷では30～40wt%のときを下限として増加に転じる。100%負荷の場合，水分無添加のときの燃費率214g/PS・h{291g/kW・h}が，水分添加率40wt%では204g/PS・h{277g/kW・h}へと4.7%の低下がみられた。

一方，B重油では，図4のように低負荷では水分添加率30wt%以上で燃費率の低下がみられるが，高負荷の場合は30wt%まで減少し，それ以上ではほぼ一定となる。本実験の範囲内では，100%負荷の場合，水分無添加のときは燃費率が悪く233g/PS・h{317g/kW・h}であったものが，水分添加率50wt%では203g/PS・h{276g/kW・h}へと12.9%の減少がみられる。軽油とB重油の真発熱量の差を考慮すれば，乳化B重油は軽油や乳化軽油を上まわる良好な燃焼を達成することができた。

5.2　排気温度

排気温度は，吸気温度を30℃一定となるようにスライドさせ，簡易修正して求めた。軽油の場合，図5のように高負荷では水分添加率の増加とともに低下するが，低負荷の場合はあまり変化しない。

一方，B重油では，図6のように水分添加率30wt%まで低下しそれ以上ではほぼ一定となる。B重油で運転した場合は，軽油使用時にくらべ排気温度が高くなるが，100%負荷では水分無添加のときの432℃から水分添加率30wt%では372℃へと大幅に低下し，乳化軽油なみまたはそれ以下の温度となっている。

排気温度の低下は，主として添加された水分の蒸発潜熱により燃焼室内部が冷却されることによるが，燃費率の低下にみられる有効仕事の増加による排気損失の低減の効果も一部含まれるものと考えられる。

5.3　排煙濃度

軽油の場合は，図7のように水分添加率50wt%で排煙濃度がゼロとなるが，40wt%までは顕著な変化がみられない。

一方，B重油では，図8のように水分無添加の高負荷時には排煙濃度が高いが，水分添加率の増加とともに急激に低下している。供試機関のような小形機関にB重油を使用すると，短時間で燃焼を完了することが困難となり，燃費率の悪化や排気温度，排煙濃度の上昇を招く。これに対して水分添加燃焼を行なうと，後述のように燃

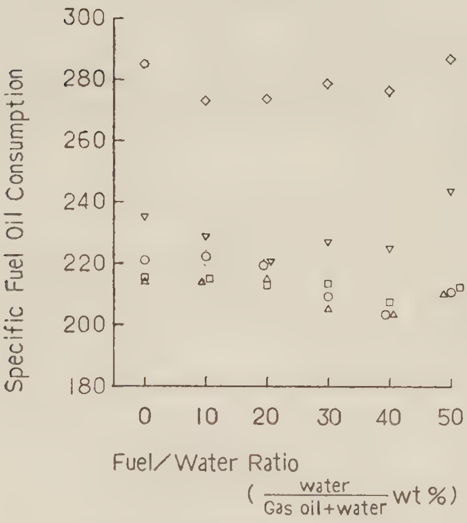


図 3　水分添加率と燃費率の関係
Specific fuel oil consumption

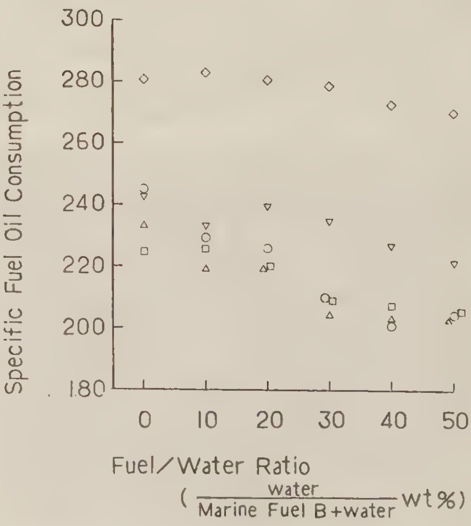


図 4　水分添加率と燃費率の関係
Specific fuel oil consumption

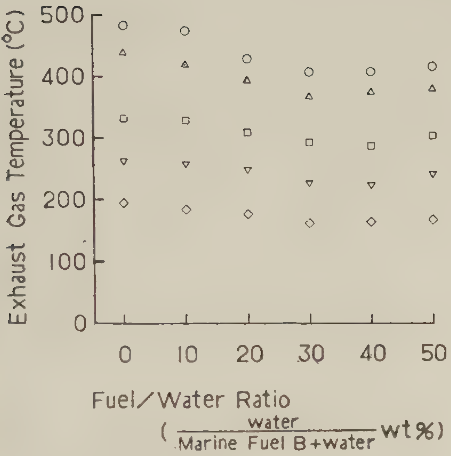


図 5　水分添加率と排気温度の関係
Exhaust gas temperature

燃料と空気の接触の機会が増加するとともに，火炎中で燃料から発生する遊離炭素が水分との間で水性ガス反応（$C+H_2O \rightarrow CO+H_2-28.1$kcal/mol）を生じ，排出されるススの量が減少するものと思われる。

5.4 排気ガス分析

内燃機関の排気ガス中に含まれ，大気汚染の元凶となる有害物質の主体として，イオウ酸化物(SOx)，窒素酸化物（NOx），一酸化炭素（CO），未燃炭化水素（HC）があげられる。ディーゼル機関は火花点火機関と異なり，空気過剰率 1 以上で運転されるため，一般に不完全燃焼により生じるCOとHCの排出は少ないが，燃焼温度が高いため空気中の窒素が酸化して生じるサーマルNOx の排出が多くなる。また，SOx の排出量は，燃料中のイオウ分にほぼ比例し，燃焼の改善による SOx の低下は期待できない[11]。従って，ここではNOx，CO，HCについて分析を行なうことにした。

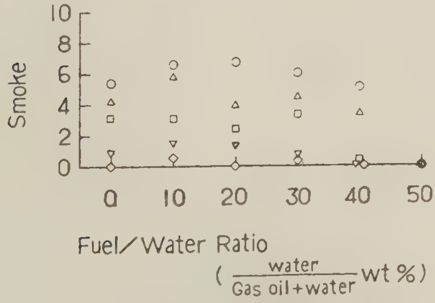


図 7　水分添加率と排煙濃度の関係
Smoke in exhaust

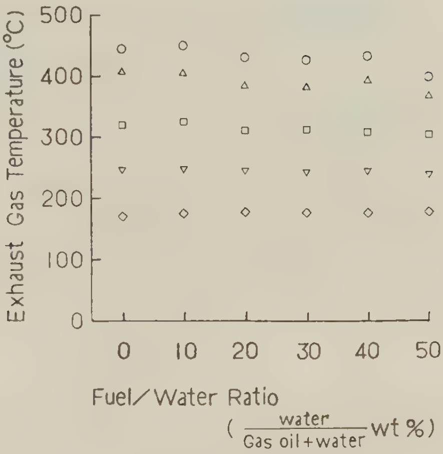


図 6　水分添加率と排気温度の関係
Exhaust gas temperature

排気ガス分析のみ，都合で冬期に実験を行なうことになった。他の測定は夏期に行なったため吸気温度は30℃前後であったが，排気ガス分析時の吸気温度は10℃程度となった。気温が低いため，燃料温度はノズル入口で50℃となる様に加熱し（B重油の場合），冷却水温度や潤滑油温度も同様に制御したが，吸気温度が低く機関からの放熱量も多いため圧縮時の燃焼室温度が低く，軽油の場合は水分添加率 50wt%，B重油のときは40wt% 以上でミスファイヤが多発し正常な運転が困難となった。そのため軽油は 40wt%，B重油は30wt% で測定を打ち切った。

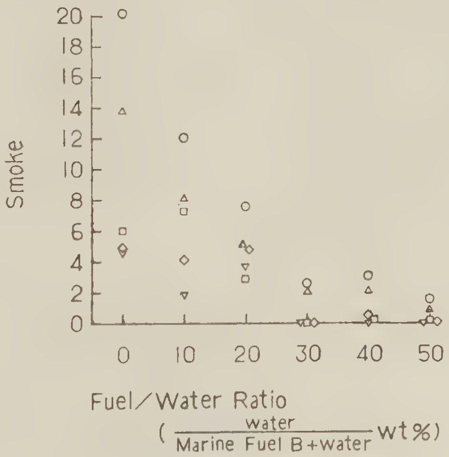


図 8　水分添加率と排煙濃度の関係
Smoke in exhaust

5.4.1　窒素酸化物

排気ガス中のNOxの濃度を一酸化窒素（NO）に換算して図9，図10に示す。軽油，B重油ともにNOxは水分減加率の増加とともに急激に低下しており，濃度の高い低負荷の場合には水分添加率30wt％で無添加のときの約半分となる。

ディーゼル機関から排出されるNOxは，高温高圧下で空気中の窒素と酸素が結合して生成するサーマルNOxが大部分である。軽油に対してB重油使用時にNOxの排出が多いのは，局部的な高温部分ができやすいことによると思われるが，B重油中に不純物として含まれる窒素分が燃焼して生じるフューエルNOxの影響も，多少あるかもしれない。乳化燃料を使用すると，水の蒸発潜熱により火炎温度が低下するため，サーマルNOxが減少する。水分添加率が少ないとき，低負荷でNOx濃度が高いのは，回転数が低いため高温における燃焼ガスの滞留時間が長いことによると考えられる。水分添加率を増すことによるNOx濃度の低下が低負荷の場合に著るしいのは，1回当りの燃料噴射量が少なく，後述のように水分添加による着火遅れが長くなるため，狭い予燃焼室における予混合燃焼の比率が大きくなり，余剰酸素と結合する機会が減少するためと推定される。

5.4.2　一酸化炭素

排気ガス中のCO濃度は，図11，図12のように，軽油

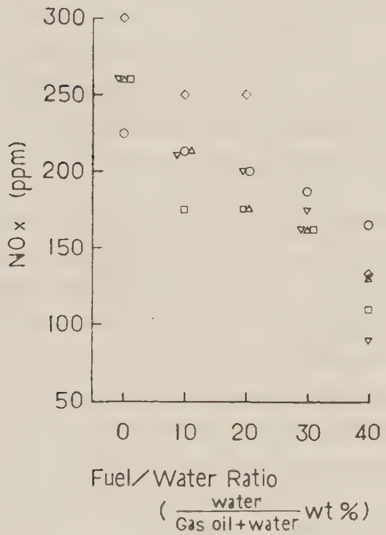


図 9　水分添加率とNOx濃度の関係
NOx in exhaust

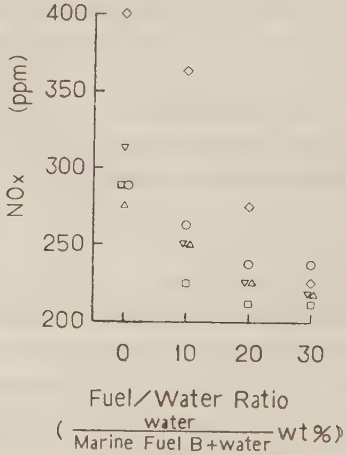


図 10　水分添加率とNOx濃度の関係
NOx in exhaust

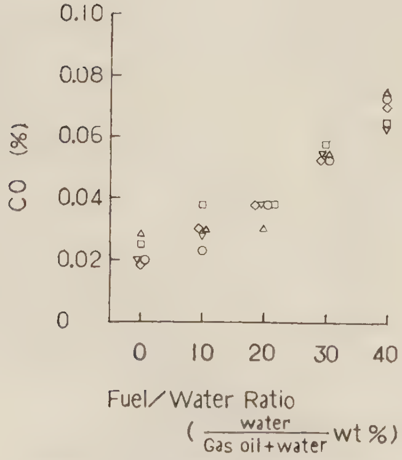


図 11　水分添加率とCO濃度の関係
CO in exhaust

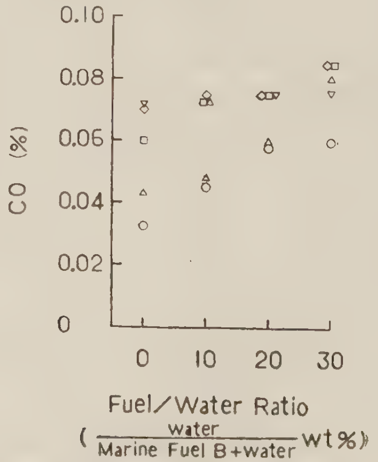


図12　水分添加率とCO濃度の関係
CO in exhaust

使用時およびB重油で高負荷のときには，水分添加率の増加とともに急激に高くなる。大形機関では，乳化燃料を使用して燃焼の改善を図った場合には CO 濃度が低下する[12)]が，供試機関のような小形機関では，低速とはいえ大形機関にくらべ回転数が高いため，前述の水性ガス反応により生じた CO の一部が完全に燃焼を終える前に排出されることにより，濃度が上昇するものと思われる。

B重油を使用して低負荷のときは，水分添加率の少ない場合でもかなり高濃度の COを排出している。これは，機関の温度が低く燃焼に時間を要する燃料のため，不完全燃焼による CO を多く発生したものと思われる。

5.4.3　未燃炭化水素

排気ガス中のHC濃度をプロパン（C_3H_8）に換算して図13，図14に示す。CO と同様に，軽油の場合とB重油の高負荷時は水分添加率に比例してHC濃度は急激に上昇する。また，水分添加率の少ないB重油による低負荷運転時には高濃度の HC を排出している。水分を添加した場合,後述のように燃料噴霧の貫徹力が増大するため，噴霧が予燃焼室壁に付着して冷却されることや，燃焼温度や燃焼室壁面温度の低下のために，熱分解生成物の一部が未燃焼のまま排出されること[13)]などによりHC濃度が上昇したものと思われる。B重油使用における低負荷時は，図4でも軽油の場合と異なり水分添加率 20wt％まで燃費率の改善がみられないように，不完全燃焼による HC が多量に排出されたものと推定される。

5.5　着火遅れ

各水分添加率におけるインジケータ線図の一例を図15に示す。水分添加率の増加とともに燃料の気化潜熱が大きくなり，予燃焼室が冷却されるため物理的な着火遅れが長くなる。通常の運転では，着火遅れは0.3～3 ms[14)]とされているが，図16，図17のように軽油の場合は水分添加率40wt％以上で，B重油では30wt％以上でこの値を越える。

5.6　燃焼室内最高圧力

燃焼室内最高圧力は，図18，図19のように着火遅れ時間の増大による予混合気生成量の増加のため，水分添加率の増加とともに上昇し，同時に圧力上昇率も高くなるため水分添加率 20～30wt％以上ではノッキング音を生じる。しかし，着火遅れがさらに延びると，図15からもわかるようにピストンが上死点を過ぎ下降を始め燃焼室容積が増大した後に着火するため，燃焼室内最高圧力はピストン速度の遅い低負荷時の一部を除き，水分添加率30～40%をピークとして以後は低下する。

5.7　考　察

予燃焼室タイプの小形漁船機関において水分添加燃焼

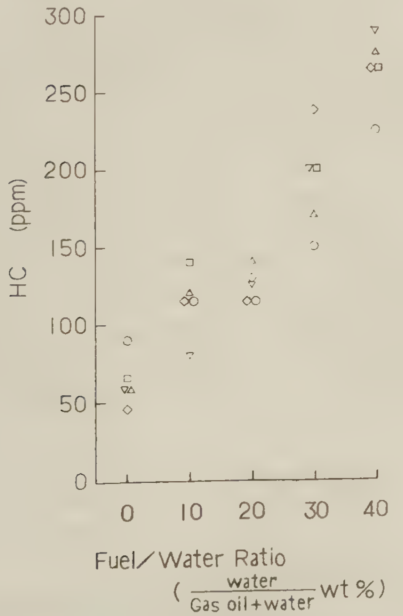


図 13　水分添加率とHC濃度の関係
HC in exhaust

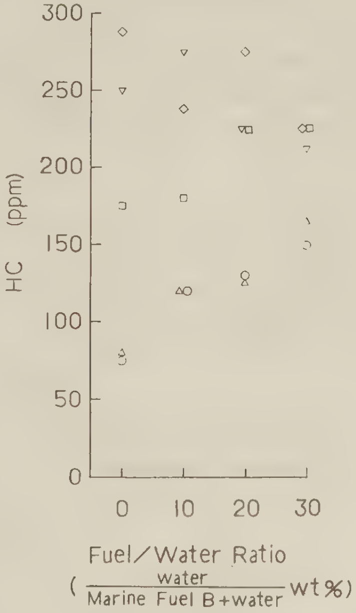


図 14　水分添加率とHC 濃度の関係
HC in exhaust

を行なった場合，100%負荷のとき軽油では4.7%，B重油では12.9%の燃費率の低減が得られた。ディーゼル機関に乳化燃料を使用することで，燃費率の低減が得られる理由として次のことがあげられる[15]。①乳化燃料中の水粒子が高温中に噴射されることによる急激な体積膨張，即ち水蒸気爆発効果による油滴の微細化，②粘度の増加による噴霧の貫徹力の増力，③噴霧の運動量の増加による噴霧束内への空気のまき込み効果，④水の含有による噴霧内の局所空気過剰率の増大，⑤着火遅れの増加による予混合燃焼量の増加，⑥燃焼温度の低下および輝炎の減少による冷却損失の低減，⑦燃焼温度の低下による燃焼時の熱解離の抑制，⑧水分の蒸発による生成ガスのモル数の増加。⑨その他物理的化学的反応。一方燃料消費率を増加させる要因として，水の蒸発潜熱による吸熱反応のための乳化燃料の発熱量の低下があげられる。このうち，ボイラにおいて乳化燃料使用による燃焼改善の主力とされている[6]①の水蒸気爆発は，ディーゼル機関の燃焼室のような高圧下ではあまり期待できないとの説[16]もあり，②噴霧の貫徹力や③運動量の増加による空気との接触の機会の増加も，予燃焼室タイプの小形機関ではあまり効果的とは思えない。従って，主として④以下の効果により，燃料ポンプ吐出量が水分添加量だけ増大するため噴射期間が延長になるにもかかわらず，燃焼期間が短縮してあと燃えが少なくなり，等容度の改善がなされたことにより燃費率が低下したものと思われる。

また，B重油の場合，水分添加率の少ないときは高負荷で排煙濃度に，低負荷ではCOやHC濃度にみられるよ

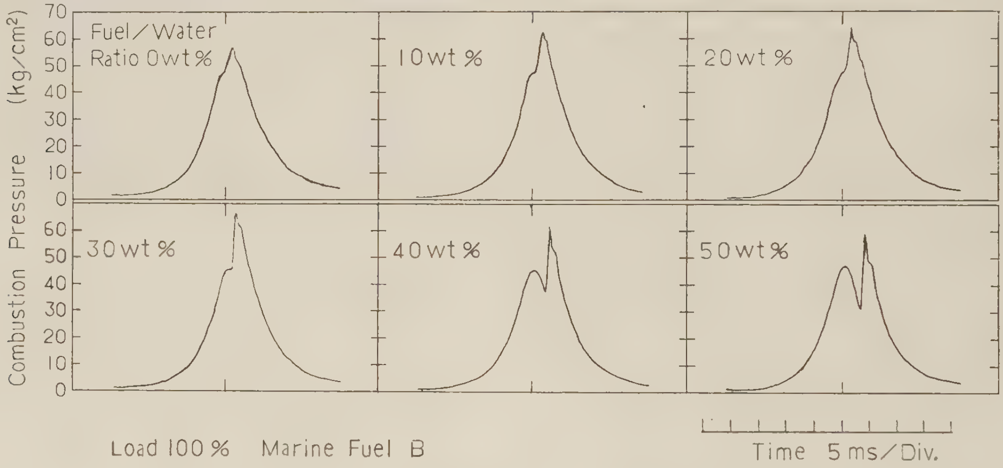


図 15　乳化B重油のインジケータ線図
Combustion pressure

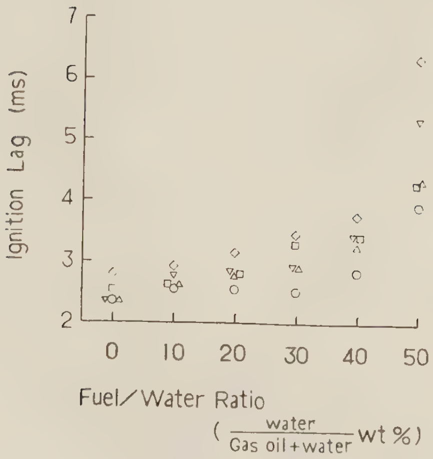


図 16　水分添加率と着火遅れの関係
Ignition lag

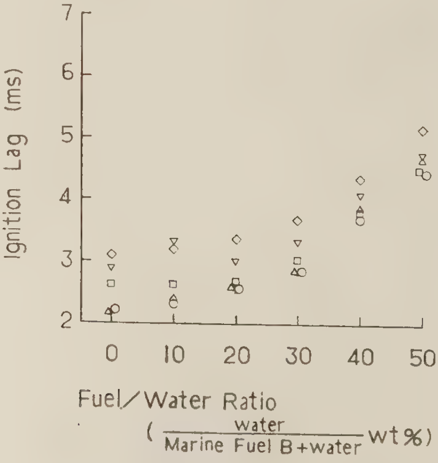


図 17　水分添加率と着火遅れの関係
Ignition lag

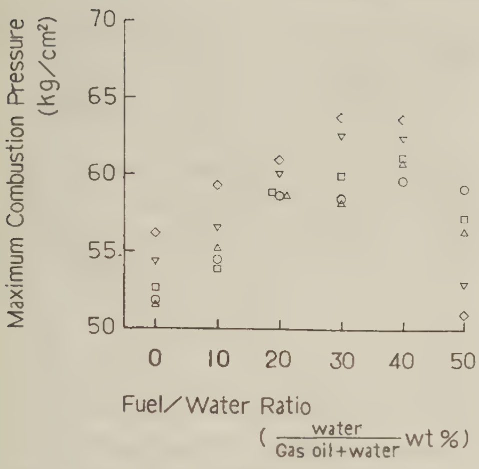


図 18　水分添加率と燃焼室内最高圧力の関係
Maximum combustion pressure

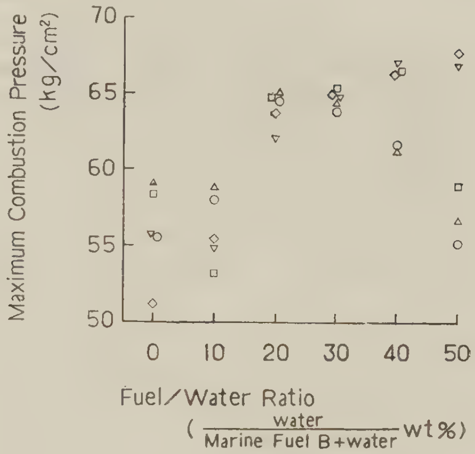


図 19　水分添加率と燃焼室内最高圧力の関係
Maximum combustion pressure

うに燃焼状態が悪く，燃焼時間が長いことにより燃費率が高い値を示していたため，軽油にくらべ水分添加による燃焼改善の効果が大きく表われたものと思われる。

しかし，水分の助けによる燃焼の改善にも限度があり水分添加率を増大すると燃料の発熱量の低下も生じるため，燃費率の下限が存在する。その値は乳化軽油の場合，高負荷では水分添加率30～40wt％に，低負荷では10～20wt％に表われ，B重油では40～50wt％の所であった。

6.　燃料噴射位置の影響

水分添加燃焼を行なうと，燃料噴射期間が延び着火遅れが長くなるにもかかわらず，燃焼時間が短縮し後もえが減少するため，燃費率が改善される。燃料噴射位置を適当に選べばさらに燃焼の改善が可能になるものと考え次の実験を行なった。すなわち，燃料噴射位置を基準の10deg.B.T.D.C.から17.5deg.B.T.D.C.まで2.5deg.毎に変化させ，高負荷（100%，8PS{5.89kW}）と低負荷（50%，4PS{2.94kW}）について水分添加率を0wt%から50wt％まで6段階にとり，運転を行なった。以下にその結果を示す。水分添加率と図中の記号の関係は，表5の通りである。

6.1　燃料消費率

燃料消費率と燃料噴射位置の関係を図20に示す。軽油の場合は明瞭な関係は得られない。一方，B重油使用時は水分添加率にかかわりなく，低負荷では噴射位置を早めると燃費率が悪化し，高負荷では12.5～15deg. B.T.D.C.に燃費率最良の点が存在する。

6.2　排気温度

排気温度と燃料噴射位置の関係を図21に示す。軽油の場合，燃料噴射位置を早めると15deg. B.T.D.C.まで排気温度は低下するが，17.5deg. ではやや上昇する。一方，B重油使用時は，低負荷では明瞭な関係はみられないが，高負荷では軽油と同様に15deg. まで低下する。

6.3　排煙濃度

排煙濃度と燃料噴射位置の関係を図22に示す。いずれの場合も，噴射位置を早めることで排煙濃度は上昇する。特にB重油の場合はその傾向が著しいが，水分添加率を増加することによる排煙濃度の低減は可能である。

6.4　着火遅れ

着火遅れと燃料噴射位置の関係を図23に示す。燃料噴射位置を早めると，予燃焼室内の圧縮空気の温度が低い

表 5　水分添加率と図中の記号
Water concentration and mark

水分添加率　Water	0 wt%	10wt%	20wt%	30wt%	40wt%	50wt%
記　号　Mark	○	△	□	▽	◇	×

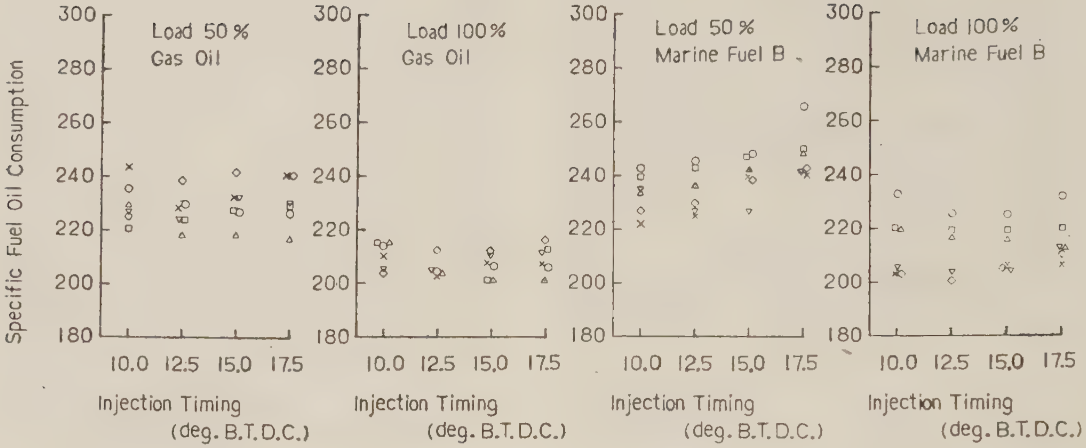


図 20 燃料噴射位置と燃費率の関係
Specitc fuel oil consumption

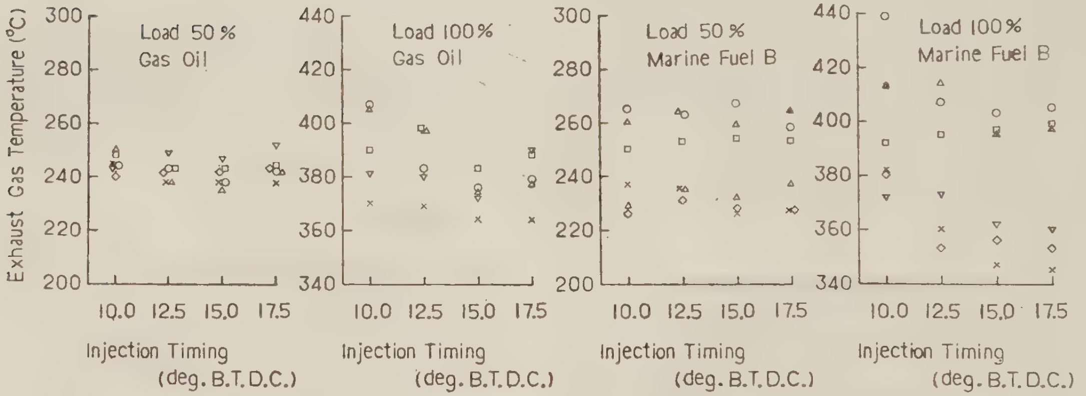


図 21 燃料噴射位置と排気温度の関係
Exhaust gas temperature

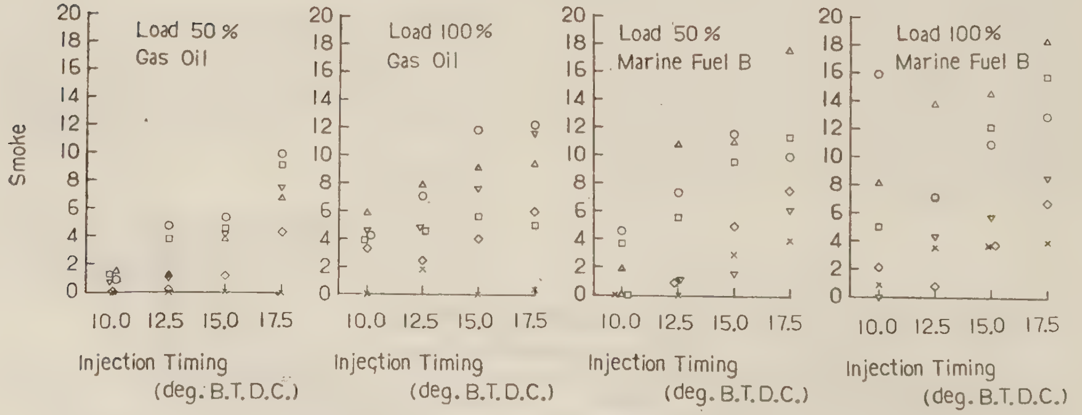


図 22 燃料噴射位置と排煙濃度の関係
Smoke in exhaust

段階で燃料が噴射されるため，物理的な着火遅れが長くなる。

6.5　燃焼室内最高圧力

燃焼室内最高圧力と燃料噴射位置の関係を図24に示す。着火遅れの増加とともに，この間に形成される予混合気の量が増大するため，燃焼室内最高圧力および圧力上昇率が高くなる。特に水分添加率の多いときはディーゼルノックを生じる。

6.6　考　察

燃料噴射位置を早めることにより，一部に燃費率の改善がみられたたのは，着火遅れが長くなり予混合燃焼部分が全体に占める割合が多くなることにより，燃焼時間が短縮され有効仕事が増加するためと考えられる。ところが，同時にこのことは燃焼が衝撃的となるため，予燃焼室噴口における絞り損失や機械損失の増加を招くことにもなる。従って，燃料油種，水分添加率，負荷率のそれぞれの組み合わせ毎に適正な燃料噴射位置が存在する。しかし，予燃焼室タイプの特長として，燃料系統が機関の性能に及ぼす影響が小さく，軽油の場合には明瞭な効果はみられなかった。

一方，着火遅れの増加による予混合燃焼の割合の増大は，燃焼室内最高圧力の上昇と圧力上昇率の増大を招く。特に水分添加率の大きいときはこの傾向が強いため，ノッキング音を生じ，機関に対する衝撃が大きく機

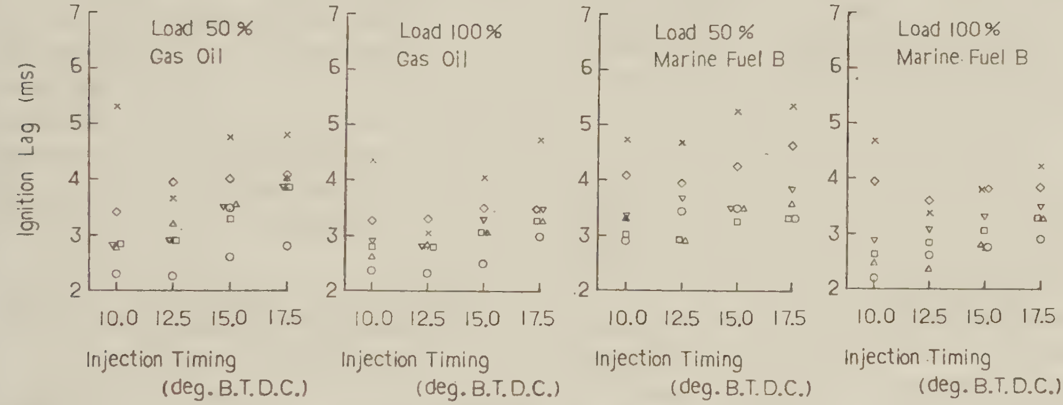


図 23　燃料噴射位置と着火遅れの関係

Ignition lag

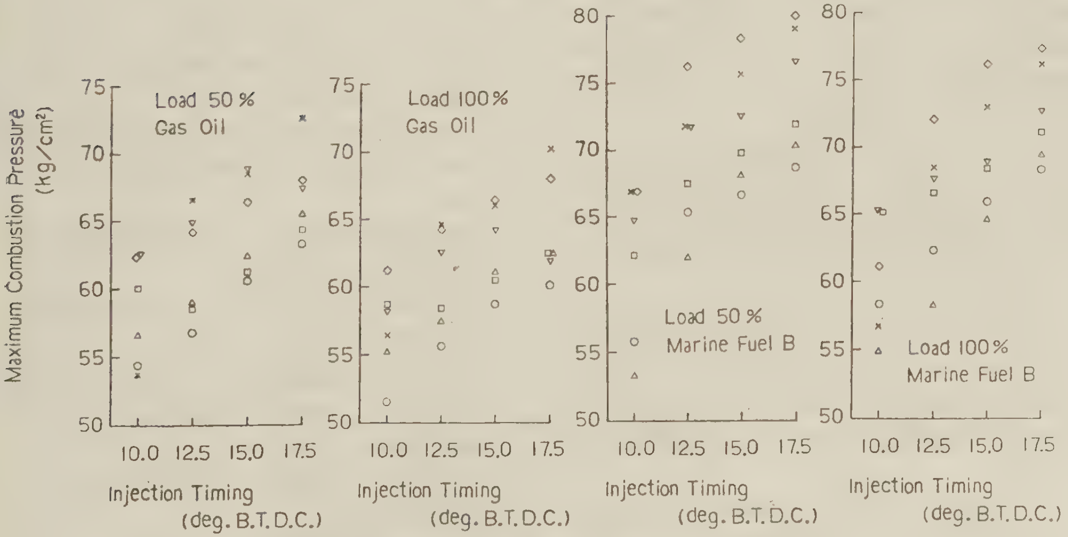


図 24　燃料噴射位置と燃焼室内最高圧力の関係

Maximum combustion pressure

械的強度に悪影響を及ぼす。

燃焼噴射位置を早めると排煙濃度が上昇した。ディーゼル機関の黒煙は，主として拡散燃焼期間において発生し，直接噴射機関では着火遅れが増大し，予混合燃焼期間の割合が増大することで排煙濃度は低下する[16]。しかし，予燃焼室機関では，クランク角度に対して噴射時期が早すぎると予燃焼室のガス流が非常に早いため空気との混合が良くなり，狭い予燃焼室の全体で同時に混合比の非常に小さい状態で燃焼が行なわれる。従って，余分の燃料が熱分解を起して多量の遊離炭素が発生する[18]こととなり水分添加率の少ない条件下では多量の黒煙を発生したものと思われる。

予燃焼室機関では，燃料系統の調整による機関性能の変化が少ないが，乳化燃料を使用したときも同様のことがいえることがわかった。また，供試機関において，水分添加による燃焼の改善を図りつつ，円滑な運動が可能と思われる実用的な水分添加率の上限は30wt％程度と考えられる。

7.　まとめ

小形漁船機関に低質燃料を使用するための，燃焼改善方法の一つとして，燃料に水分を添加した乳化燃料について検討を行なった。低質燃料にはB重油を使用し，比較のために軽油も用いた。水分添加率が0から10wt％毎に50wt％まで6段階の乳化B重油および乳化軽油を作製し，予燃焼室タイプの小形〔Ⅰ〕低速機関で運転を行なった。その結果次のことが判明した。

①乳化燃料を作製後静置すると，乳化軽油の場合は短時間でクリーミングを生じた。この場合，沈澱した部分の水分は約50vol％となる。一方，乳化B重油の場合は凝結を生じるが，クリーミングは生せず，軽油にくらべ安定したエマルジョンが得られた。

②乳化燃料を使用することで燃費率の改善が得られた。100％負荷のとき，水分無添加の場合に比べ乳化軽油では水分添加率40wt％で燃費率が4.7％低下，燃焼状態の悪いB重油では水分添加率50wt％で燃費率12.9％の低下が得られた。

③乳化燃料を使用することで，排気温度，排煙濃度の低下が得られた。

④排気ガス分析を行なったところ，水分添加率にほぼ比例してNOx濃度は低下したが，COとHC濃度は逆に上昇した。

⑤水分を添加すると燃料の気化潜熱が大きくなるため，着火遅れが長くなり，予混合燃焼の割合が増大するため圧力上昇率が大きくなり，水分添加率20〜30wt％以上ではノッキング音を生じる。燃焼室内最高圧力も上昇するが，水分添加率40〜50wt％では着火遅れがさらに長くなりピストンが下降をはじめた後に着火するため，逆に低下する。

⑥燃料噴射位置を変更することによる燃費率改善の効果は大きくなかった。また，燃料噴射位置を早めることにより着火遅れの増加，燃焼室内最高圧力の上昇，排煙濃度の上昇が生じた。

⑦供試機関における実用的な水分添加率の上限は30w％程度と考えられる。

8.　あとがき

小形漁船機関に低質燃料を使用する場合，水分を添加して乳化燃料とすることで燃焼の改善を図ることが可能であり，軽油なみの燃費率が得られることが判明した。

ディーゼル機関の場合は，プランジャや燃料弁，軸受やシリンダライナとピストンリングなど，重要な摺動部分を多く有するため，これらに対する水分の悪影響が心配される。本実験は短時間運転のため，乳化燃料が機関の耐久性に及ぼす影響は判明しなかったが，別に乳化B重油による長時間運転を実施しているので，追って結果を報告したい。

本稿をまとめるに当ってご指導を賜った。東京漁業技研代表取締役草間喜代松氏に深謝する。また，排気ガス分析は(株)堀場製作所東京支店松本興一氏のご協力により可能となったものであり，燃料の性状分析は全漁連油質研究所富越晧祐氏にお願いした。ここに記して深謝する。

参考文献

1)　水産庁：昭和55年度漁業の動向に関する年次報告，第94国会（常会）提出，1981

2)　(社)漁船機関士協会：漁船の省燃油機器開発研究事業に関する報告書（漁船機関代替燃油実用化試験）1981

3)　(社)漁船協会ほか：かつおまぐろ漁船省エネルギー対策研究会報告書，1981

4)　A重油にC重油をブレンド，以西底引で採用へ，水産経済新聞，1981．7．1

5)　小田健一：漁船機関におけるA/Cブレンド油の使用について，水産工学研究所報告，2号，pp.75〜93，1981

6)　井原博之：乳化燃料，三菱石油技術資料，53号，pp.48〜53，1979

7)　倉沢二郎・大西敏春：舶用ボイラにおける水注入燃焼について，日本舶用機関学会誌，15巻，2号，

pp.204～209, 1980
8) 岡本哲：中小形中速機関と低質油について，日本舶用機関学会誌，15巻，2号，pp.214～220，1980
9) Sherman P: Emulsion Science, Academic Press Inc. (London) Ltd., 1968
10) 大形ディーゼル研究委員会：舶用機関の呼称区分の統一について，日本舶用機関学会誌，13巻，7号 pp.506～507，1978
11) 渡辺敏行：排気ガス中のイオウ酸化物規制について，舶用機関，44号，pp,75～89，1977
12) Taylor. D. H.: Exhaust Emissions from Medium Speed Diesel Engines, Preprint of ISME TOKYO, 1978
13) 古浜庄一：HC 生成とその対策，内燃機関，14巻，162号，pp.16～22，1975
14) Lyn W.T. and Valdmains E.: Proc. Inst. Mech. Engrs. Pt. 2A, pp.34, 1966
15) 村山正・塚原実・吉本康文：ディーゼル機関に水エマルジョン燃料を適用した場合の燃焼促進効果に及ぼす燃料性状の影響，内燃機関合同シンポジウム講演論文集，pp.19～24，1979
16) 三橋一哉ほか5名：乳化燃料のディーゼル機関適用に関する研究，三菱重工技報，15巻，2号，pp. 1～8，1978
17) 鈴木孝・小林昭夫：圧縮着火機関の黒煙，内燃機関，14巻，162号，pp.60～71，1975
18) 徐　錫洪：予燃焼室ディーゼル機関の燃焼，内燃機関，11巻，120号，pp.240～250，1972

Burning of Oil／Water Emulsified Fuel on Fishing Boat Engine (Part I)

By

Ken'ichi ODA and Toshio YAMADA

Summary

One of the results of continuously rising oil prices in the last few years has been increasing importance to reduce specific fuel consumption of fishing boat's engine and to burn heavier low grade fuel for saving fuel cost.

Oil/water emulsified fuel has been taken interest as the method of reducing NOx emission and making better combustion on the boiler.

So, for improving the performance of a pre-combustion type small-sized fishing boat diesel engine, emulsified gas oil and emulsified Marine fuel B were used (Marine fuel B: viscosity Red.1 200sec. at 100°F). A range of oil/water content were chosen from 0wt% to 50wt% at intervals of 10wt%. Engine tests were undertaken at 25%, 50%, 75%, 100% and 110% load and compared engine performance for several water contents.

Figure 3～24 show the effect of oil/water emulsified fuel on engine performance. The emulsified fuels are able to reduce the specific fuel consumption and emulsified Marine fuel B can obtain specific fuel consumption almost the same as gas oil or emulsified gas oil (Fig. 3, 4).

At high power the emulsified fuels fall the exhaust temperature (Fig. 5, 6). The emulsified fuels reduce smoke in the exhaust and emulsified Marine fuel B are more remerkable (Fig. 8, 9). Results of exhaust emission analysis, emulsified fuels reduce NOx in exhaust but increase CO and HC (Fig. 9～14). Combustion pressure at several water contents show Fig. 15. Emulsified fuel make longer ignition lag (Fig. 16, 17) and increase muximum combustion pressure and peak pressure obtain at oil/water ratio 30～40wt% (Fig. 18, 19).

Using emulsified fuel we were able to make better combustion of heavy low grade fuel on small-sized fishing boat engine. But we are not yet abailable the bad infruence of water in fuel for engine parts for example corrosion of fuel system. So it is necessary to make sure the effect of emulsified fuel for maintenance of engine.

水工研報告 3
1982 pp. 187〜193

魚体反射率測定における同時較正法

宮野鼻洋一*・石井　憲*・古沢昌彦*

目　次

1. はじめに……………………………………………… 187
2. 反射率測定の際の較正方法の検討……………… 187
3. 同時較正法の原理及び特徴……………………… 188
4. 同時較正法の問題点の検討……………………… 189
 4.1 ハイドロホンの指向性 ……………………… 189
 4.2 ハイドロホンと反射体との距離 …………… 189
 4.3 送受信系統 ………………………………… 191
5. 検証実験………………………………………… 191
6. おわりに………………………………………… 191
 参考文献………………………………………… 192
 Summary ……………………………………… 193

1. はじめに

水産資源を合理的に活用しようとした場合，まずその質的量的な把握が必要となる。そのため，従来より漁獲統計の解析，標識放流，卵稚仔魚調査等の方法によって水産資源調査が行われてきた。しかしながらこれらの方法には多大の時間と労力を要し，しかも間接的な結果しか得られないという欠点がある。

これに対し，近年，魚群探知機等の超音波機器を用いた資源調査方法が直接性，迅速性，確度等の点で注目されるようになった。この音響による資源調査方法には種々の方式がある[1]。

このうち，現在主流となっている魚量または資源量推定の方法は，魚群のエコーのパワーをアナログ的に処理する積分方式である[2]。この方式によって得られるのは魚体反射率（ターゲットストレングス）と分布密度の積，即ち体積散乱強度である。したがって魚体反射率があらかじめわかっていなければ，分布密度を求めることはできない。

また体長推定に関しては，反射率方式[1]が実用化されつつあるが，この方式では対象魚群のエコーから単体エコーを分離し，この大きさから反射率を測定し，反射率と体長との関係から体長を推定する。したがって，この場合にも魚体反射率を体長の関数として予め知っておかねばならない。

反射率の測定については従来より数多くの報告があるが，それらについて整理した Love (1971) によると，同一体長及び周波数に対する反射率が一桁以上も異る場合がある[3]。また筆者らもこれまでに簡単な方法で反射率を測定してきたが，測定結果にかなり大きな変動が出ることが多い。これらのことは反射率測定方法自体にも問題が多く，その確立が急務であることを示している。

そこで筆者らは従来の測定方法を検討し，改良を加えることによって，反射率測定の確度向上をはかりつつある。今回は主として送受信系の較正方法について改善し，較正誤差の少い同時較正法を考案し，検討を加えたので報告する。

2. 反射率測定の際の較正方法の検討

反射率の測定は一般に図1のようにして行われる。送信パルスの振幅をE_s，送波器の感度（送波感度）をS，反射体と送受波面との距離をr，反射体の音圧反射率をγ，受波器の感度（受波感度）をM，受信器の増幅度を

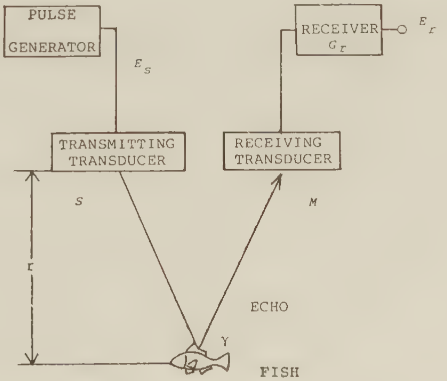


図 1　一般的な反射率測定方法
Usual method for target strength measurement

---

* 漁船工学部

G_r とすると，近距離を対象とするため吸収減衰を無視することができるのでエコーパルスの振幅 E_r は次式となる。

$$E_r = E_S\ S\frac{1}{r}\gamma\frac{1}{r}M\ G_r$$

$$\gamma = \frac{1}{E_S S M G_r}r^2 E_r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

（1）式の分母（送受信係数）は反射率測定前に予め較正しておく必要がある。従来行われてきた較正方法には大別して以下の4方法がある。

①　送波器と受波器とを対向させ，送受信係数を測定する（送受対向法）。

②　較正済みのハイドロホンまたは送受波器によって較正する（標準ハイドロホン法）。

③　標準反射体によって較正する（置換法[4]）。

④　直接波音場と反射波音場とを受波器を反転させて測定し，送受信係数を得る（スライド法[4]）。

ところで，反射率に寄与する環境要因として水温，塩分濃度，海水密度，気泡，濁度等が考えられるが，これらは反射率に寄与すると同時に，送受信係数にも影響を与えると考えられる。図2は昭和55年11月に鹿児島県の長島で，150mmφの標準反射体の反射波レベルを観測した結果である。この測定は上記の③の置換法に相当する方法で行ったもので，周波数50kHzの送受波器を使用したが，海水中の気泡等の影響によって反射波レベルの測定値は大きく変動することがわかる。なお，図中＊印をつけた異常値は送波面に付着した気泡によるもので，送波面を洗浄したところ解消した。

このような現象がある限り，予め送受信係数を測定し較正を済ませていても，時間が経過し，環境要因が変動すれば，較正をやりなおさなければならないことになる。したがって，較正と同時に反射率を測定しなければ，正確な測定はできない。しかし，上に述べたような方法で較正を行う限り較正と測定とが別個に行われるので，較正と測定との間に時間的ずれが生じ，この時間的なずれが送受信系の較正上の誤差を生み，反射率測定の確度を低いものにしていると考えられる。

3.　同時較正法の原理及び特徴

以上のことから反射率測定において環境要因や送受波感度などの変動を受けないようにするには，較正と測定を極力同時に行う必要がある。そのためには，各送信パルス毎に直接波と反射波とをとらえれば良い。図3にこれを可能にする同時較正法の原理を示した。すなわち送波器と反射体との中間に小型無指向性ハイドロホンを設置し，これによって直接波と反射波とを観測する。

ここで送波器からハイドロホンまでの距離をr_h，送波器から反射体までの距離をr_r，送信時から直接波の立ち上りまでの時間をt_d，同様に反射波の立ち上りまでの時

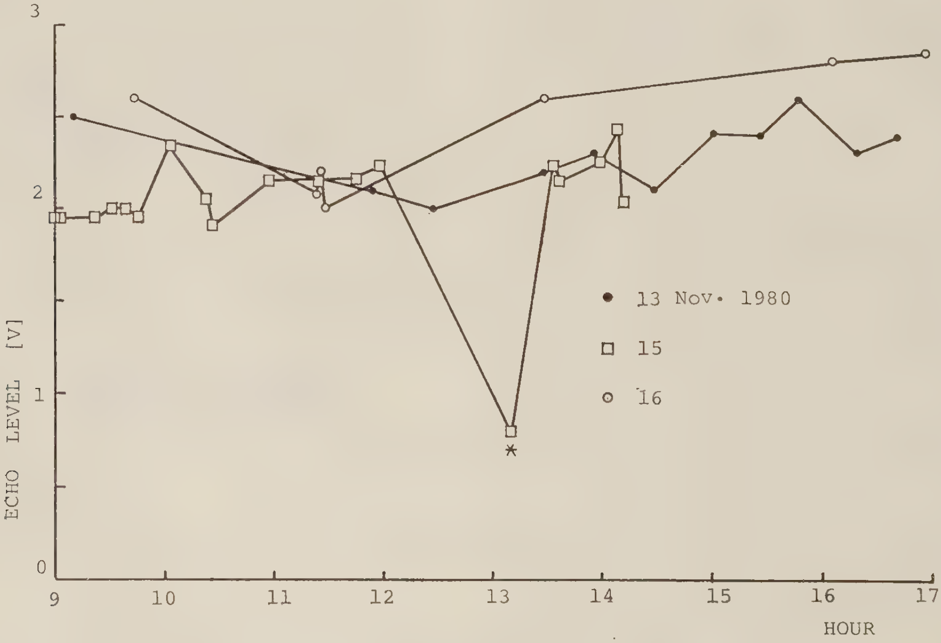


図　2　標準反射体の反射波レベルの変動

Fluctuation of the echo level of a solid sphere

間をt_r，送波音圧をp_0，反射体の反射率をγ，音速をc直接波に対するハイドロホン感度をMd，反射波に対するハイドロホン感度をMr，直接波に対する受信器ゲインをG_d，反射波に対する受信器ゲインをG_r，直接波の出力電圧をE_d，反射波の出力電圧をE_rとすると以下の式が成立する。

$$E_d = p_0 \frac{1}{r_h} M_d \ G_d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$E_r = p_0 \frac{1}{r_r} \gamma \frac{1}{r_r - r_h} M_r \ G_r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

$$\therefore \gamma = \frac{G_d}{G_r} \ \frac{M_d}{M_r} \ \frac{r_r(r_r - r_h)}{r_h} \ \frac{E_r}{E_d} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

$$\frac{r_r(r_r - r_h)}{r_h} = \frac{c(t_r^2 - t_d^2)}{4t_d}$$

直接波及び反射波が同一の受信系で増幅される場合には，その直線範囲が広い限り，$G_d/G_r = 1$ である。

またM_d/M_rはハイドロホンの直接波側と反射波側との（180°異る方向の）感度比であり，予め較正を必要とするが，超小型，無指向性のハイドロホンを使用すれば，$M_d/M_r \fallingdotseq 1$ となり，この較正の誤差はごくわずかである。したがって予めr_r, r_hまたはt_d, t_rを測定しておけば，E_r，E_dから反射率γを計算することができる。

この同時較正法の長所は以下の通りである。

① 直接波と反射波を，同一送信波に対して同時に測定するのであるから，較正する必要がなく，較正の手間・時間が省略できる。

② 気泡等による送波レベルの変化，軽微な吸収減衰，受波感度の変化などによる較正上の誤差の影響を受けにくい。

③ 送波器，ハイドロホン，反射体が同一直線上に有れば，送波器の揺れ（指向性）の影響がない。

④ 送波レベルの変動が同時にモニターできる。

一方，以下のような問題点がある。

⑤ 小型・無指向性のハイドロホンを必要とする。

⑥ 送受信系のQ，反射体の近距離音場，E_r/E_dなどの値を考慮してハイドロホンや反射体の設置位置を慎重に決定する必要がある。

⑦ 受信系のダイナミックレンジを広くし，雑音を十分小さくする必要がある。

以下これらの問題点について検討を行う。

4. 同時較正法の問題点の検討

4.1 ハイドロホンの指向性

この測定に用いるハイドロホンは180°異る方向の感度がほぼ同じであり，ハイドロホンが反射体への入射音波の邪魔にならないよう小型である必要がある。このような条件を満すハイドロホン（Brüel & Kjær製，TYPE 8103, 9.5mmϕ）の指向特性から得た180°異る方向の感度比（M_d/M_r）の値を，指向特性測定の際の基準方向からの角度θに対して示したのが図4である。この図に従うと，θを50°または150°付近に選べば25～200kHzの周波数について測定する場合でも$M_d/M_r \fallingdotseq 1$となり，較正誤差をごくわずかにすることができる。

4.2 ハイドロホンと反射体との距離

同時較正法では受波器が無指向性であるため，一般にSN比が低下する。そこでSN比を向上させるには(3)式より明らかなようにハイドロホンと反射体の距離（r_r－

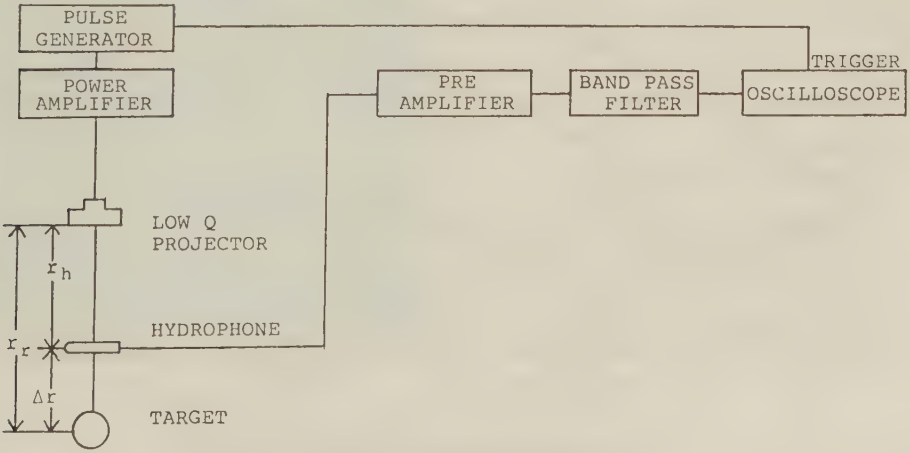


図 3 同時較正法の原理

Principle of simultaneous calibration method in target strength measurement

r_h）を小さくして，反射波レベルを大きくする必要がある。しかし，これをあまり小さくしすぎると，レベルの大きな直接波の裾との干渉によって，反射波のレベルに誤差が生じる。そこでこの点について以下検討を加える。

一般に共振系のステップ応答のエンベロープは立ち上りからの時間をt_1，共振周波数をf，尖鋭度をQで表すと以下のようになる。

$$1-\exp\left(-\frac{\pi}{Q}f t_1\right)$$

また立ち下りからの時間をt_2で表すと次式となる。

$$\exp\left(-\frac{\pi}{Q}f t_2\right) \quad \cdots\cdots(5)$$

直接波のレベルは，τをパルス幅とすると，送信時から$t_d+\tau$経過した時最大となり，その後（5）式に従って低下する。よって送信時からt_r経過した時の直接波レベルは送受信係数を省略すれば以下のようになる。

$$\frac{1}{r_h}\left\{1-\exp\left(-\frac{\pi}{Q}f\tau\right)\right\}\exp\left\{-\frac{\pi}{Q}f(t_r-t_d-\tau)\right\} \quad \cdots\cdots(6)$$

ところで，パルス幅を十分大きくとれば（6）式で$1-\exp(-\pi f\tau/Q)\fallingdotseq 1$である。故に送信時から$t_r$経過した時の直接波のレベルと反射波のレベル$\gamma/r_r\cdot(r_r-r_h)$との比$\eta$は次のようになる。

$$\eta=\frac{1}{\gamma}\ \frac{r_r(r_r-r_h)}{r_h}\exp\left[-\frac{\pi f}{Q}\left\{\frac{2(r_r-r_h)}{c}-\tau\right\}\right] \quad \cdots\cdots(7)$$

ここでτを波形が最大値のαに達するパルス幅とすると，（7）式は以下のようになる。

$$\eta\simeq\frac{1}{\gamma}\ \frac{1}{1-\alpha}\ \frac{r_r(r_r-r_h)}{r_h}\exp\left\{-\frac{2\pi f(r_r-r_h)}{cQ}\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

（8）式を具体化したのが図5である。例えば，周波数50kHzで，ηを1％とすると，Qが30の場合にはハイドロホンと反射体との距離を2m以上離さなければならないが，Qを3とすれば0.2mも離せば十分であり，SN比を

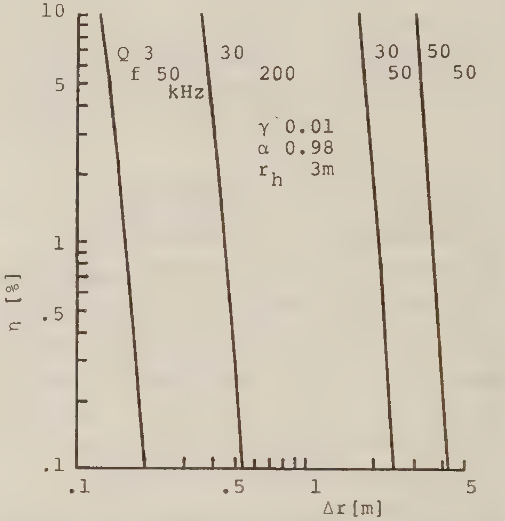


図 5　直接波の裾のレベルと反射波のレベルとの比
Amplitude of direct wave trail normalized by amplitude of reflected wave

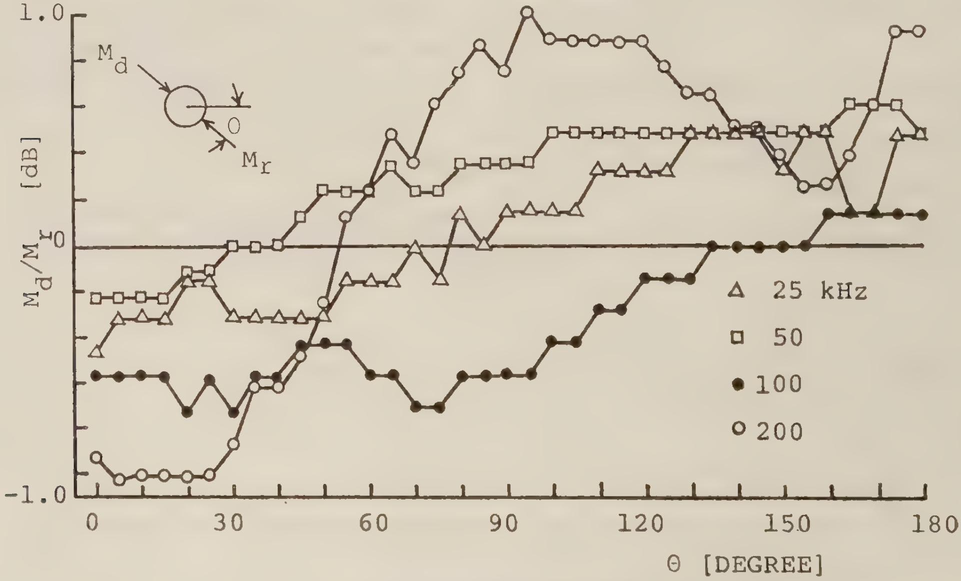


図 4　使用ハイドロホンの180°異る方向の感度比（Md/Mr）
Ratio of sensitivities of a hydrophone when measured in opposite directions

向上させることができる。したがって周波数が低い場合には低Qにする必要があることがわかる。低Qにする場合には送波器を反射傘型にすれば良い。

4.3　送受信系統

送受信系で問題となるのは雑音，入出力特性の直線性，レベルの読み取り等であり，以下検討する。

受波器の無指向性に基く雑音は，既に述べたようにr_r-r_hを小さくし，静穏で雑音となる散乱体のないような環境を選ぶことにより，かなり改善できる。しかし低Qにする必要があるので，その他の原因による雑音についても十分留意する必要がある。具体的には送波レベルを極力大きくしてSN比を上げ，4.2で述べた干渉による制限の許す限り帯域幅を狭め，さらに前置増幅器は低雑音のものを選べば良い。

直接波のレベルと反射波のレベルとはかなり大きく異る。よって，この両者を同一受信系で増幅する場合，その増幅器の直線性を良くしなければならない。この際，極力前段で両者のレベルを大体そろえておき，それ以後は同一系統で増幅すれば，増幅度の変化や非直線性の影響を受けにくくなり，同時法の長所を生かすことができる。

直接波，反射波のレベルの読み取りをオシロスコープを用いて目測するのは，非常に労力を要する上，誤差が大きく，又同時性を害う。したがって検波後のパルス波高の自動読み取りをするのが良い。

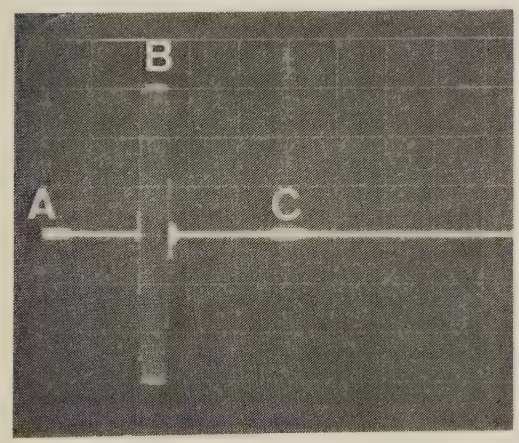


図 6　受信波形の例

An example of the direct wave (B) and reflected one (C) from a 150mmϕ solid sphere. Vertical scale is 50mV/div. and horizontal scale is 0.5msec/div.

5.　検証実験

標準反射体として150mmϕアルミ剛球を用いて検証実験を行った。測定装置は図3の構成とし，ハイドロホンは図4の特性のもの，周波数は50kHz，送波器は低Qにするため反射傘型のものを用いた。

この実験は鹿児島県，長島で昭和55年11月に行った。図6はr_hを2.15m，r_rを3.10mとした時の受信波形の例である。図中，縦軸1目盛は50mV，横軸1目盛は0.5msecであり，Aは送信開始時点，Bは直接波，Cは反射波を示している。

この図を見ると，低Qであるために直接波の立ち上り，立ち下り時間がきわめて短くなっていて，その裾の反射波に対する干渉はきわめて小さいことがわかる。

表 1　アルミ鋼球に対する測定結果

Measured target strength γ of a 150mmϕ solid sphere

No.	E_d [mV_p]	E_r [mV_p]	γ	γ/γ_c [%]
1	115	3.25	.0387	103
2	118	3.75	.0437	117
3	108	3.50	.0446	119
4	103	3.00	.0401	107
5	104	3.20	.0421	112
6	104	3.25	.0428	114
7	105	3.40	.0444	118
mean			.0423	113

r_h:2.15m,Δr:.95m,γ_c=.15/4=.0375

表1に結果を示したがγの各測定値（(4)式参照），及びそれと反射率の理論値γ_c＝直径／4との比γ/γ_cの各値，そしてその平均値を見ると，今回の測定値はかなり理論値に合致していると言える。しかし，測定値はすべて理論値より大きく，しかも同一の実験系を用いているにもかかわらず多数回行うと測定値が変動する傾向が認められた。これは主として目視誤差や雑音によると考えられる。

6.　おわりに

同時較正法による反射率測定が有効であることは判明したが，装置及び環境要因の変動に基くと思われる測定値の変動や経時変化については問題が残った。また，SN比を向上させるためにハイドロホンと反射体とを近づけた場合に問題となる反射波の近距離音場についても検討する必要がある。

目下，反射波を増幅した後，直接波と同時に自動的に読み取り印字する装置を試作しており，これが完成すれ

ば測定も容易かつ正確に行えるものと思われる。

また，多周波について同様の測定を行えるようにし，それら一連の測定及び処理を計算機の制御の元で行えるシステムを開発中である。

さらに環境要因については，環境情報同時測定機能を上記システムに取り入れ，経過時間，DO，水温等が測定値にいかなる影響を及ぼすか検討していく予定である。

本研究の目的は魚体反射率の測定であり，今回はその測定法について検討を加えたが，今後はサンマ，サバ，イワシ等種々の有用魚種について，本法を用いて反射率を測定し，魚種，体長，体重等と反射率との関係についても考察していく予定である。

参考文献

1)　古沢昌彦：超音波利用による漁業資源調査，Ocean Age，Vol.13，No.1，pp.27〜39，1981.

2)　古沢昌彦・石井憲・間庭愛信：超音波漁量計の開発，電子通信学会技報，Vol.80，No.114，pp.1〜8，1980.

3)　Love，R. H.：Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish，Jor. Acoust. Soc. America，Vol. 49，No.3，pp.816〜823，1971.

4)　間庭愛信：mm波超音波を応用した水中測器の開発に関する研究，水産庁漁船研究室　研究報告第4号，pp.1〜137，1962.

Simultaneous Calibration Method in Measurements of Target Strength of Fish

By

Yoichi MIYANOHANA, Ken ISHII, and Masahiko FURUSAWA

Summary

In order to estimate the fish biomass density or the size of the fish by acoustic means, the target strength of the fish must be measured beforehand. In this measurement transmitting and receiving devices should be calibrated. But calibrated values may vary with components in water (e. g. air bubbles), as time passes. So the calibration must be done as simultaneously as possible with the target strength measurement. Usual calibration methods, however, are so timeconsuming that the measurement is not simultaneous with the calibration.

Therefore the authors developed a simultaneous calibration method in target strength measurement. In this method a hydrophone is put between a projector and a target, and it receives both the direct wave and the reflected one. The target strength can be computed from the amplitude ratio of thus obtained two waves.

The merits of this method are as follows.

(1) As the calibration is simultaneous with the measurement, it does not require time and labor.

(2) Calibration errors are very slight.

(3) If a projector, a hydrophone, and a target are on a straight line, the directivity pattern of the projector need not to be considered.

(4) Every projected sound level can be always monitored.

On the other hand, restrictions of this method are as follows.

(5) It needs a small omnidirectional hydrophone.

(6) The distance from a projector to a hydrophone or to a target must be carefully determined, considering Q factor of the projector, the near field of the target, and the amplitude ratio of the direct wave and the reflected one.

These method were examined experimentally and some measurements were performed on a standard reflector.

水工研報告 3
1982 pp. 195～211

事故網の破網特性

下崎吉矩*・西田　進**・武富　一*

目　次

緒　言 ………… 195
1. 実験材料 ………… 195
2. 方　法 ………… 195
3. 結　果 ………… 199
3.1 コントロール網の性状 ………… 199
3.1.1 目　合 ………… 199
3.1.2 結節緊定度 ………… 199
3.1.3 判　定 ………… 199
3.2 網地の応力測定結果 ………… 200
3.2.1 測定部位による変動 ………… 200
3.2.2 経糸と緯糸の差異 ………… 200
3.3 網地の破断 ………… 201
3.3.1 網地破断応力・伸度 ………… 201
3.3.2 網地の破形 ………… 203
4. 考　察 ………… 203
5. 結　語 ………… 205

緒　言

事故網の網地の特異性について，曽て著者らは「事故網の特性について」という報文1)によって報告を行ない，そのような網では，網目を構成する緯糸と経糸の長さの不同性が著しく，網目のなす四角形は変則的な菱形をなしていること，この結果として網地の横目方向荷重に対する応力は正常網とは反対に縦目方向の応力より小さくなっていること，また目滑り強度が大で結節緊締度が甚だしく大きいことなどを指摘した。

しかし，それらの網地が操業中に破網するときに，正常と目される一般の網に較べて網地内の脚糸の応力はどのようになっているのか，何故に破網伝播方向が斜め方向でなく水平方向になるのか，そして何よりも何故に破網は起り易いのか等の疑問は残されたままになっていた。

その後，三陸から東海沿岸における鰮鯖旋網の操業においても同様な事故がうったえられ，これを調査したのを機会に，上記の疑問に応えたいと考えて実験を行ない，これらについて若干の知見を得たので報告する。

1.　実験材料

この実験に用いられた材料網地の詳細は表1に示される。材料網地DNは前に報告した1)事故網の調査網地そのもので，この網地から縦目方向と横目方向にそれぞれ21目を切り取って網地標本とした。また材料網地CNはコントロール網地として使用するもので，表1に示すようにナイロンの210D，10本格の蛙又網で，規格目合は10節である。

2.　方　法

これらの材料網地から，縦横それぞれ21目づつの網目

表1　実験材料
Experimental materials

記号	標本網地 繊維材料・規格	備　考
CN	ナイロン210*D*，（3＋3＋4）本，10節 （ストレツチ目合：3.34cm） 蛙又結節，21目×21目	正常新品網地
DN	ナイロン210*D*，（4×3）本，10.7節 （ストレツチ目合：3.12cm） 蛙又結節，21目×21目	アイスランド周辺において使用された事故網（異常網）操業使用14回

---

* 漁業生産工学部　　** 西田製網所

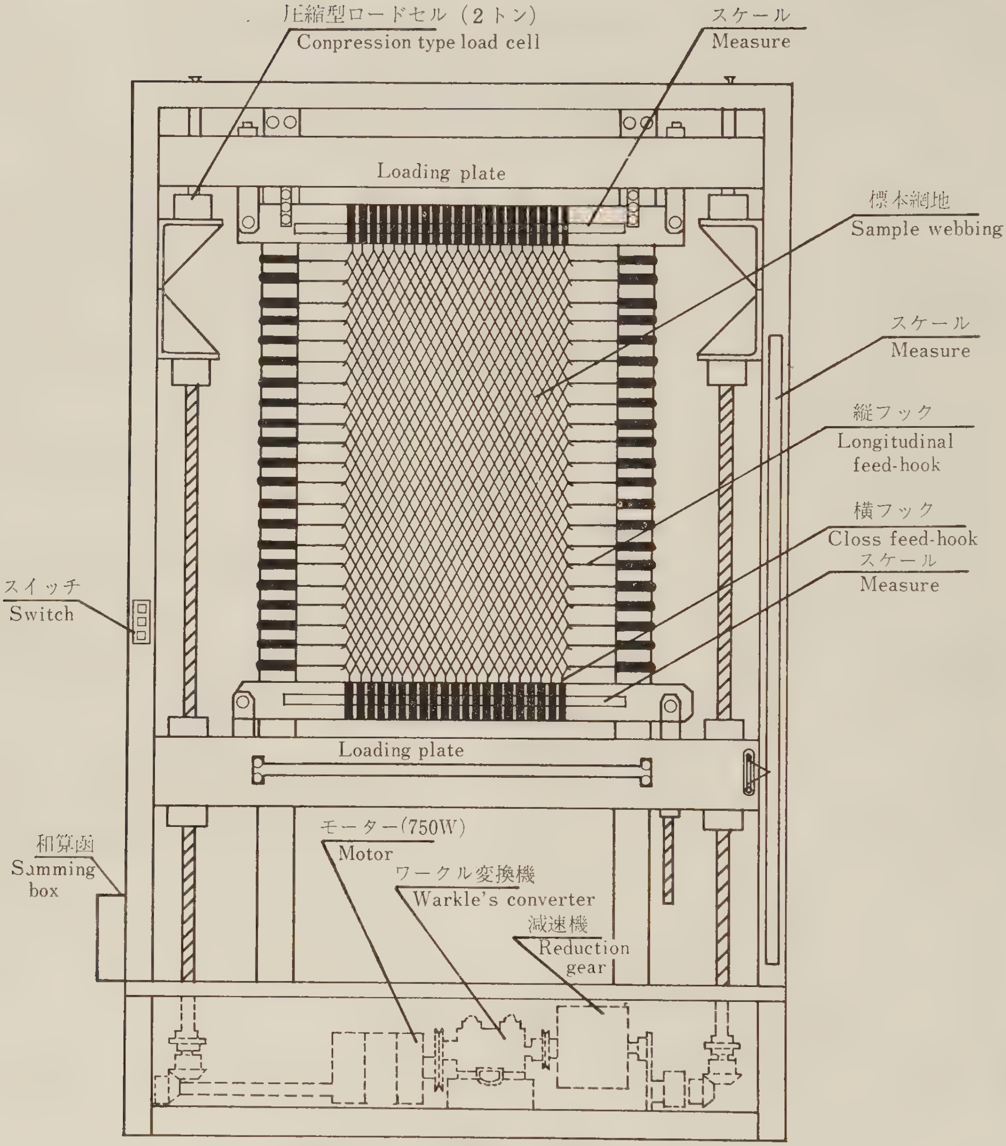

圧縮型ロードセル（2トン）
Conpression type load cell
スケール
Measure
Loading plate
標本網地
Sample webbing
スケール
Measure
縦フック
Longitudinal feed-hook
横フック
Closs feed-hook
スケール
Measure
スイッチ
Switch
Loading plate
和算函
Samming box
モーター(750W)
Motor
ワークル変換機
Warkle's converter
減速機
Reduction gear

図 1　網地応力分布測定装置への標本網地への取付け
Experimeutal apparatus and fitting of sample webbing

をもつ網地を切り取って標本網地とし，これを図1に示すように応力分布測定装置2) に60%の縮結でとりつけ，網地全体の破断応力，伸度を測定すると共に，網目の所定の脚糸にとりつけたトランスデューサーによって，それらの脚糸の網地への荷重中の応力の変動を測定した。重荷速度は30cm/minである。

第1段の実験として，経糸と緯糸の荷重中における応力変動の差異を調べるために5個のトランスデューサーを図2に示すように配置して標本網地に荷重した。これによる実験を実験Iとする。図2に示すようにトランスデューサーを標本網地の最上の脚糸から3段目，6段目，16段目．27段目，39段目に取付ける場合に経糸の応力を，4，7，17，28，38段目の各脚糸に取付ける場合に緯糸の応力をそれぞれ測定するように配慮した。トランスデューサーの番号は上からNo. 1～No. 5とした。

次に，荷重中における一つの網目のおのおのの脚の応力の配分をみるために図3に示す位置にトランスデューサーを取付けて，脚応力の測定を行なった。網目内各脚

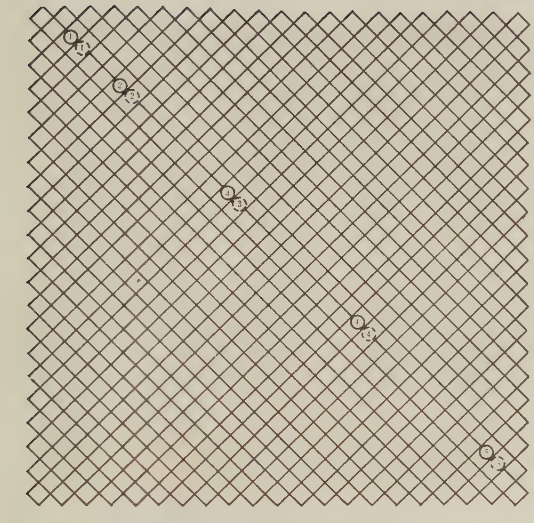


図 2　だ験1における脚糸応力測定のための張力計の配置

①,②,③,④,⑤：経糸応力測定時の張力計配置

①,②,③,④,⑤：緯糸応力測定時の張力計配置

Illustration of the transducers fitted to a sample webbing for a measurment of the stress in the bars when webbings extended

①,②,③,④,⑤ : Disposition of the transducers in a sample webbing fitting to the shattle twine bars

①,②,③,④,⑤ : Disposition of the transducers in a sample webbing fitting to the loop twine bars

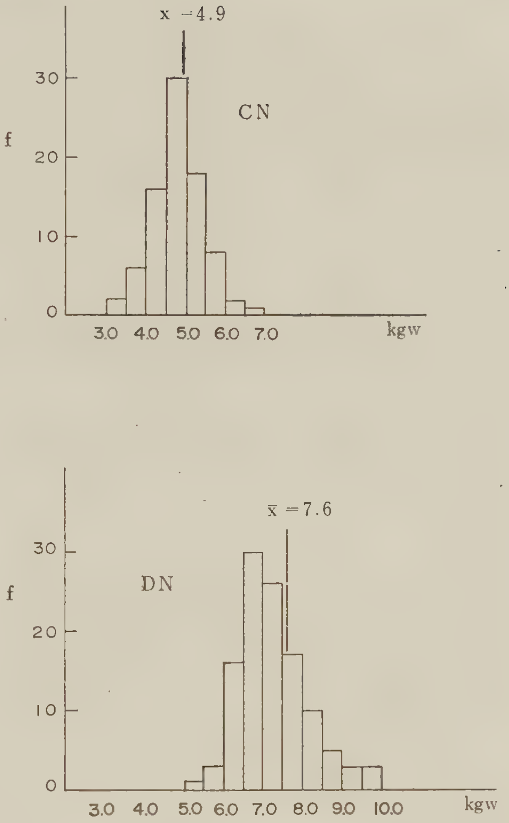


図 4　コントロール網と事故網の目滑り張力の分布

Knot slip resistance of control webbings and defective ones

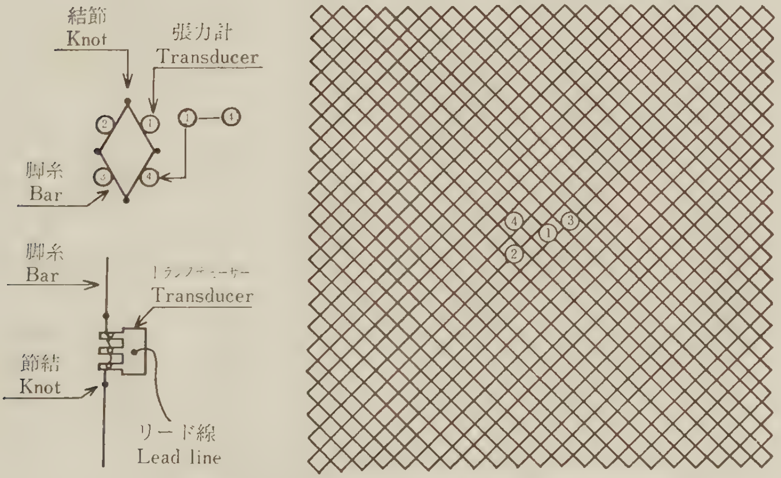

結節
Knot
張力計
Transducer
①
②
③
④
脚糸
Bar
脚糸
Bar
トランスデューサー
Transducer
節結
Knot
リード線
Lead line

図 3　実験Ⅱにおける脚糸応力測定のための張力計の配置

Disposition of the transducers fitted to the sample webbing in experiment Ⅱ.

表 2　標本網地の目合測定結果　（単位：cm）

Mean values of the mesh size in stretch of sample webbings obtained from the determination

状況	標本網地	*CNT*			*CNY*			*DNT*			*DNY*		
		n	$\bar{x}$	v	n	$\bar{x}$	v	n	$\bar{x}$	v	n	$\bar{x}$	v
破断試験後	横目合	76	3.39	0.00961	26	3.47	0.01136	38	2.87	0.01458	49	2.94	0.01921
	縦目合	27	3.62	0.00991	37	3.53	0.00943	20	3.10	0.01192	50	3.15	0.01470
	比		0.937			0.983			0.926			0.933	

無荷重	標本網地	*CN*			*DN*		
		n	$\bar{x}$	v	n	$\bar{x}$	v
	横目合	116	3.40	0.01366	60	2.79	0.01341
	縦目合	112	3.53	0.01202	56	3.05	0.01328
	比		0.963			0.915	

註）n：測定数，$\bar{x}$：平均値，v：変動係数

表 3　縦目方向荷重時の網地内脚応力（実験 I）

Mean values om the stress in the bars determined when webbings are lraded to the length side direction on a webbing (Exp. I)

標本網地 Sample webbing	脚糸 Bar	荷重 weight (Kgw)	50	100	150	200	250	300
CN	経糸(gw) Shattle twine	T.N. 1	1925	3453	5203	6816	8262	8993
		T.N. 2	1775	2625	3945	5153	6286	
		T.N. 3	1834	3163	4528	5843	7132	7796
		T.N. 4	1590	2423	4002	5525	7006	7556
		T.T. 5	1269	2573	3911	5249	6451	6900
	緯糸(gw) Bobbin twine	T.N. 1	1501	2897	4297	5688	7115	7942
		T.N. 2	1380	2610	3915	5116	6272	6706
		T.N. 3	1632	3053	4662	6118	7690	8378
		T.N. 4	1181	2364	3570	4704	5859	
		T.N. 5	1250	2877	4261	5544	6852	
DN	経糸(gw) Shattle twine	T.N. 1	2083	3600	5033	6382	7678	9053
		T.N. 2	1697	2931	4181	5306	6639	7639
		T.N. 3	2242	3784	5186	6506	7826	8952
		T.N. 4	1909	3726	5459	7019	8445	9950
		T.N. 5	1722	3028	4278	5306	6639	7611
	緯糸(gw) Babbin twine	T.N. 1	1965	3549	4968	6285	7703	8949
		T.N. 2	1556	2833	3944	4944	6000	7000
		T.N. 3	1414	3497	4888	6255	7605	8914
		T.N. 4	1687	2998	4218	5304	6468	7666
		T.N. 5	1729	2827	5056	6416	7467	8560

糸の応力は同図左側の別図に示すようにNo. 1～No. 4のトランスデューサーが取付け難いので，これに対応するよう至近の位置の脚糸に取付けた。トランスデューサーの脚糸への取付け方は同図左下に示した。なお，トランスデューサーは水工研報告 No. 2 に報告したものと同じものを同いた。このようにして行なった実験を実験Ⅱとする。

この実験において，材料網地CNを応力分布測定装置に縦目垂直に取付けたときの標本はCNT，横目を垂直に取付けたときの標本をCNYとし，材料網地DNを縦目垂直に取付けたものはDNT，横目垂直の取付け標本をDNYとして取扱かった。

3. 結　果

3.1 コントロール網の性状

コントロール網として使用する網地が正常と認められ得るものであるかどうかを検討するために，CN，DNの両網について目合の，またCNについて結節緊定度の測定を行なった。測定方法は著者らが前に行なった方法1)によった。

3.1.1 目合　目合の測定は同一網目の各脚の長さを測定し，その偏差率の大きさをしらべた(表2)。測定して計算したM′/Mの値は 0.936 で事故網の特性として報告した値1)の0.91や0.89よりかなり大きく，一般使用中の網の0.95，0.96にほぼ近い値をもつものであり，経糸と緯糸の長さの間に事故網ほど異常に大きな偏差があるとは考えられない。

3.1.2 結節緊締度　結節の緊締の強さをあらわす測度としての目滑り張力の測定結果をヒストグラムにして図4に示す。同図から知られるようにCN標本の測定からの最大目滑張力平均は5.5kgwと得られたが，これはこの程度の規格の正常な網地の平常値であり1)，同図のDNの最大目滑張力7.6kgwより2kgw以上も小さいことが知られる。

3.1.3 判定　コントロール網CNについての目合ならびに結節緊締度の測定結果得られた測定値やそれから計算された評価測度の値は，今までに鰮鯖旋網操業にお

表 4　横目方向荷重時の網地内脚応力（実験Ⅰ）

Mean values of the stress of the bars determined when webbings are loaded to the depth side direction on a webbing (Eyp. Ⅰ)

標本網地 Sample webbing	脚糸 Bar	荷重(Kgw) Weight	50	100	150	200	250	300
CN	経糸(gw)	T.N.* 1	1723	3667	5544	7485	9156	
	shatlle twine	2	1560	3090	4650	6091		
		3	1641	3405	5078	6842	8433	
		4	1416	3188	5000	6754	8249	
		5	1346	3001	4636	6297	7722	
	緯糸(gw)	T.N. 1	1190	2644	3911	5327		
	Bobbin twine	2	1565	2520	3510	4590	5461	
		3	1558	2933	4270	5545		
		4	1143	2180	3128	3999		
		5	1103	2306	3447	4385		
DN	経糸(gw)	T.N. 1	1908	3953	5745	7527	8956	10367
	Shattle twine	2	1778	3139	4583	5972	7333	8583
		3	1596	3183	4759	6157	7266	8627
		4	1463	3074	4741	6567	8282	10104
		5	1587	3208	4749	6197	7408	8808
	緯糸(gw)	T.N. 1	1602	2988	4413	5400	6321	7257
	Bobbin twine	2	1486	2917	4320	5556	6598	7764
		3	1555	3027	4091	5261	6447	7675
		4	1282	2418	3459	4151	4978	5906
		5	1387	2747	4053	5243	6400	7483

* T.N.：トランスデューサー番号

て安定的に使用された網地のそれと類似し，異状と目された値とは可成りの差異を示した。したがってこの実験における標本網地CNは事故網のコントロール網として比較対象用の網地として妥当なものとみなしうるものである。

3.2　網地の脚糸応力測定結果と考察

3.2.1　脚糸応力（実験Ⅰ）　経糸と緯糸の応力差を確認するために行なった実験Ⅰの結果を表3および4に示す。この実験では，脚糸応力測定のためにトランスデューサーを図2に示すように配置した。経糸と緯糸は網地をつくるとき交互の段を構成するので，網地の同じ部位で段違いにトランスデューサーをとりつければ経糸なら経糸のみの測定が，緯糸なら緯糸のみの測定が出来ることになるのでこのような配慮のもとで経糸の測定時と緯糸の測定時にそれぞれ図2に示すような配置としたのである。すなわち網地の各部位での経糸の応力を測定するときは①，②，③，④，⑤などの位置に配置して荷重し，緯糸を測定しょうとするときは①，②，③，④，⑤などの位置に配置して実験した。実験回数はCNY，DNT，DNY 共各2枚の標本について行なった。表5，6の値はそれらの平均の値である。

表3の値によると，60％の縮結で展開している網目が縦目方向垂直に荷重されたとき，コントロール網CN（標準網）では，経糸と緯糸に生じている応力に，はっきりした差異は認められないようである。しかし，このとき事故網DN（異常網）では，明瞭ではないが，荷重50kgw 毎の両脚脚糸応力間にはやや相異らしいものがあらわれ，同じの値について較べてみると，経糸の大きい場合の方がはるかに多いようである。網地が横目方向に垂直に荷重された場合には，CN，DNとも経糸の応力の方が大きいという傾向は可成り顕著にみられる（表4）。

これらの表から得られる情報の一つで，見落すことの出来ないのは，各荷重段階で，網地の上端から下端へかけて斜め一線上に配置したT.Nの値が下方へいくにしたがって小さくなってる場合と上方と下方の値に較べ中央部が比較的小さい値をもつという傾向がみられることである。

3.2.2　脚糸応力（実験Ⅱ）　CNT，DNTの実験で得られた50kgw毎の脚糸応力を表5に，CNY，DNYのそれを表6に示す。これらの数値は何れも標本網地6枚についての測定の平均値である。

表5の値は標本網地CNが縦目方向荷に重されたとき荷重の大きさに関わりなく，経糸と緯糸の応力には差異がないということ，しかし事故網DNTでは経糸と緯糸応力の差$\varDelta S_{s-l}$は50〜350kgw の各荷重段階でほぼ一定で，しかもその経糸からの偏差率は荷重の増大と共にむしろ小さくなっているようにみえる。

表6に示す結果は，網地が横目垂直に下方に荷重された場合の経糸と緯糸の応力を示すものである。CNYで

表 5　縦目方向荷重時における網目の経糸応力と糸緯応力測定結果（実験Ⅱ）

Defference between the stress of shattle twines and of loop twines when sample webbings are loaded to the length side direction on a webbing (Ex.II)

標本網地	張力計	荷重 (kgw) 50	100	150	200	250	300	350	備　考
CN(gw)	T.N. 1	1705	3247	4734	6294	7778			経糸応力
	T.N. 2	1621	2834	4310	5727	6887			
	T.N. 3	1560	3048	4658	6154	8156			緯糸応力
	T.N. 4	1683	3112	4428	5829	7143			
	$\varDelta S_{s-l}$	−42	−39	21	18	317			経糸応力の緯糸応力からの偏差
		(−2.5%)	(−1.3%)	(0.5%)	(−0.3%)	(4.3%)			
DN(gw)	T.N. 1	1755	3389	4964	6211	7592	9424	10846	経糸応力
	T.N. 2	1533	2593	3556	4609	5822	7161	8024	
	T.N. 3	2216	3874	5397	6720	7840	9514	10914	緯糸応力
	T.N. 4	1954	3635	4887	6024	7418	8835	9574	
	$\varDelta S_{s-l}$	441	790	882	962	1922	882	809	経糸応力の緯糸応力からの偏差
		(26.8%)	(26.7%)	(20.7%)	(17.8%)	(13.7%)	(10.6%)	(8.6%)	

註）1. $\varDelta S_{s-l}$：経糸応力の緯糸応力からの偏差，（　）内は百分率
2. T.N.：トランスデューサー（張力計）番号

表 6　横目方向荷重時における網目の経糸応力と緯糸応力測定結果（実験 II）

Defference between the stress of shattle twines and of loop twines when sample webbings are loaded to to the depth side direction on a webbing (Ex. II)

標本網地	張力計	荷重(kgw) 50	100	150	200	250	300	備考
CN(gw)	T.N. 1	1381	2781	4057	5266	6451	8748	緯糸応力
	T.N. 2	1288	2720	4116	5363	6810	8510	
	T.N. 3	1591	3122	4480	5943	7235	8217	経糸応力
	T.N. 4	1631	3159	4816	6306	7745	8177	
	ΔS_{s-l}	326	391	561	810	810	568	経糸応力の緯糸応力からの偏差
		(20.3%)	(14.2%)	(13.7%)	(15.2%)	(12.2%)	(5.0%)	
DN(gw)	T.N. 1	1473	2550	3655	4977	6095	6788	緯糸応力
	T.N. 2	1670	3041	4308	5945	7015	7703	
	T.N. 3	1747	3335	4717	6524	7955	9356	経糸応力
	T.N. 4	2075	3658	5495	7398	9058	10233	
	ΔS_{s-l}	339	701	1125	1500	1952	2549	経糸応力の緯糸応力からの偏差
		(21.6%)	(25.1%)	(28.2%)	(27.5%)	(29.8%)	(35.2%)	

註）1. ΔS_{s-l}：経糸応力の緯糸応力からの偏差，（　）内は百分率
2. T.N.：トランスデューサー（張力計）番号

は経糸と緯糸の応力の差 ΔS_{s-l} は荷重の増加と共に増大の傾向にはあるが，その変化は比較的小さい。したがって各荷重段階における経糸と緯糸の応力偏差率は，荷重の小さい間は高く，大きくなるにともなって小さくなっているのが特徴的である。

事故網 DNY では，むしろこれと逆の傾向がみられる。すなわち，ΔS_{s-l} は網地応力が 50kgw になるまではに荷重中の張力は CNT とほぼ同じ値であるのに，荷重の増大とともにその値は急速に増大し，結果として，経糸からの偏差率は21.6%から35.2%へと高くなってくる。

3.3　網地の破断

網地の破断特性をしらべるために実験 I および II と同じ方法・条件によって標本網地の破断試験を行ない，これらの全データについて，網地破断の特性を検討した。

3.3.1　網地の破断応力・伸度　60%の縮結に展開した網地を図 1 の装置によって荷重破断させたときの，破断応力と伸度の測定結果を表 7 に示す。

CN と DN との間の差異については網糸のサイズが異なっているので比較出来ないが，CN についてみると，破断応力では CNY と CNT の差は13kgw で CNY の値が大きいが，差異が明白とは云いきれない。DN では逆に DNY の方が DNT より平均で26kgw 小さく，有意に小さいと云える。

伸度については，CN では CNT と CNY の間の差異は

表 7　標本網地の破断力および伸度と平均値の差異

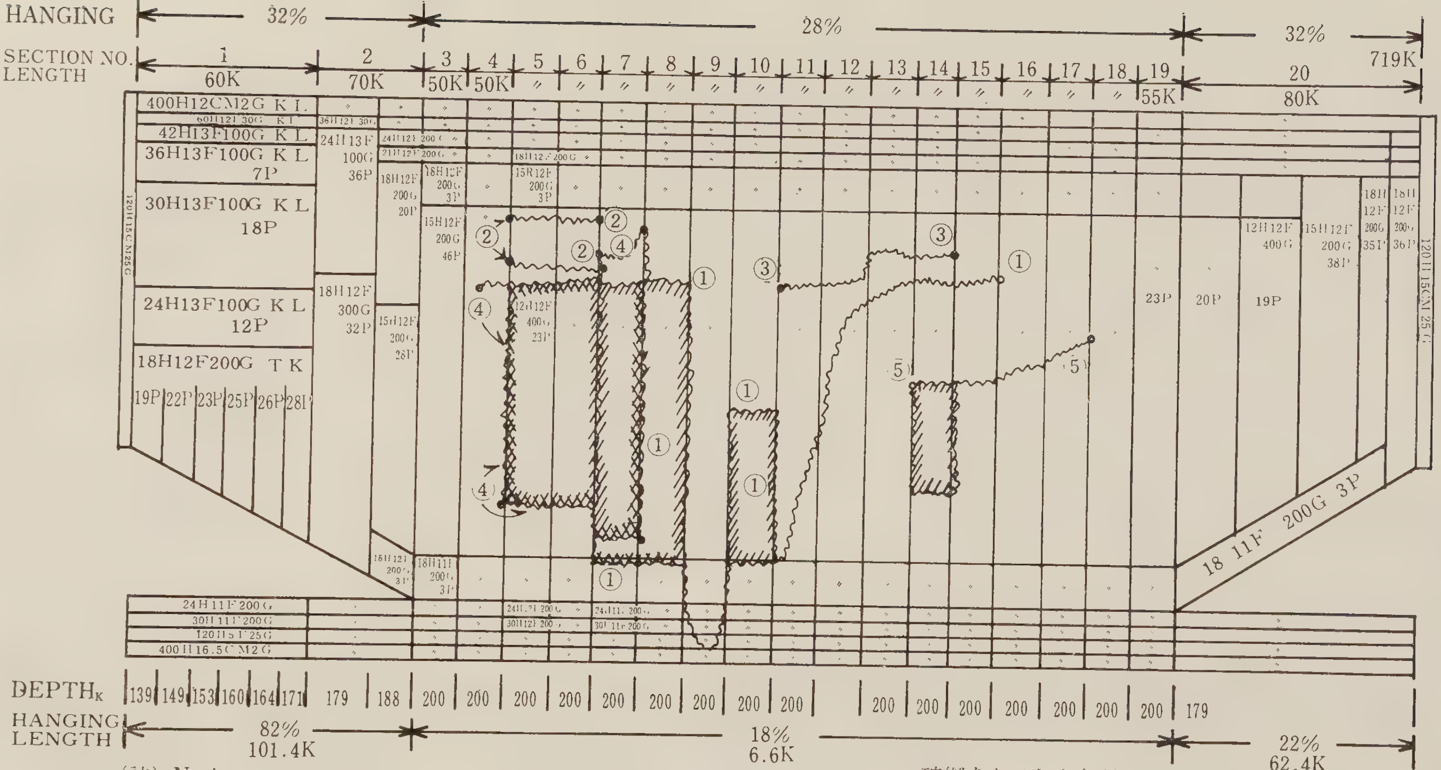
Breaking stress and elongation of the sample webbings

測定項目	標本	測定数	平均	差	自由度	t
破断応力 (Kgw)	CNT	16	271	13	25.4	1.69
	CNY	16	284			
	DNT	15	341	26	18.6	3.50
	DNY	15	315			
伸度 (%)	CNT	15	35.8	1.5	22.7	1.4
	CNY	15	34.3			
	DNT	14	31.6	3.0	26.9	4.03
	DNY	13	28.6			

表 8　標本網地の破網方向　(%)

Brocken patterns of sample webbings in the experiment

破網方向 Running direction	CNT	CNY	DNT	DNY
HR	6.3	15.0	50.0	24.5
VR	0	3.1	7.5	12.5
SR	93.7	81.9	42.5	63.0


HANGING
32%
28%
32%
SECTION NO.
LENGTH
1
60K
2
70K
3
50K
4
50K
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
55K
20
80K
719K
719K
400H12CM2G K L
42H13F100G K L
36H13F100G K L
7P
30H13F100G K L
18P
24H13F100G K L
12P
18H12F200G T K
19P
22P
23P
25P
26P
28P
24H13F
100G
36P
18H12F
300G
32P
15H12F
200G
26P
18H12F
200G
20P
18H12F
200G
3P
15H12F
200G
46P
15H12F
200G
3P
12H12F
400G
23P
23P
20P
19P
12H12F
400G
15H12F
200G
38P
18H
12F
200G
35P
18H
12F
200G
36P
18 11F 200G 3P
120H15CM25G
24H11F200G
30H11F200G
120H15F25G
400H16.5CM2G
① ② ③ ④ ⑤
DEPTHK
139
149
153
160
164
171
179
188
200
179
HANGING LENGTH
82%
101.4K
18%
6.6K
22%
62.4K

（註）Notice

H：トワインの太さを示す本数	Number of yarn in a twine, which size of a yarn is 210 denirer.
F：節　数	Number of knot, which is represented by numbers of bar having between a stretched webbing 30.3 cm long.
G：掛　目　数	Number of mesh in depth of a panel of a gear.
CM：目合の単位 センチメートル	Centimeter.
K：間	Ken; 1 Ken is 151.5cm.
P：パネル	Panel

破網をおこした年月日
Date when the breakage of the netting caused.

①：24th September 1979
②：3nrd October 1979
③：5th October 1979
④：9th October 1979
⑤：11th October 1979

図５　東日本沿岸の操業で発生した鰮旋網の事故網の破網例（自1979年９月至同年10月）
Illturation of a defective sardine purse seine brocken during the operation from September 1979 to October 1979.

明白でないが，DNTとDNYの差異は明らかである。

3.3.2　網地の破形　網地の破断応力測定において破断した網地の破形を調査した。各標本網地についての破形のスケッチを付図１～４に，その代表的なパターンをPlate Ⅰ－Ⅳ に示す。図中の丸で囲んだものは小破れ，鍵形は脚糸のみの破断，波線二本は連続的な脚糸の破断を示すものである。また矢印は破断時の観測その他の状況から，破網の始端と方向を推定して示すものである。

これらの図についてみるに何れの網も破れは比較的標本網の中部から上部にかけて多く，CN の破形は比較的単順な斜めもしくは傘形の走りが多い。DN では小破れが多く，破れはかなり復雑な形をしており，かつ前者に較べて水平方向へ向う破れが多くみられるのが特徴的である。ちなみに，破れの斜走を SR，縦走を VR，横走を HR として整理してみると結果は表８のようになって，CNでは SR の割合が多く全体の 80%以上を占めるのに対し，DNのそれは 70%以下であり，比較的にYR，SR が多い傾向がみられる。破網の始点をみつけるのは困難であったが，付図からみる限り CN では上部の破網が圧到的に多かったのに対しDN ではかなり下部の方に及んでいるのが特徴的である。

4.　考　　察

実験１における脚糸応力測定の結果，垂直方向に一様な大きさの荷重を受ける網地では，着力側よりもむしろ固定サイドの脚糸に大きな応力が生じていることが知られたが（表３，４），これらの網地の破形をみると（付図１～４），その破れの始点のはっきりしないものが多いけれど，とにかく，上部固定サイドに近い部分の破網に比較的多くみられる。しかもこの傾向は正常網とみられるコントロール網の方が異常網である事故網よりも著しいように思われる。このことは，このような外力に対して網地の脚には反着力点側に大きな張力が働いて，その部位で破断応力を超える脚から破網をおこすことになるが，事故網のように脚をなす経糸と緯糸の間の長さの変動が大きい場合（表２）には，一様な荷重に対して部分的に大きな張力が働らき，表５，６にみられるように，時として荷重の作用点付近で大きな応力をみることになり，したがってこの部位で破断が始まることもあるということを示すものと考えられる。このような事象は今後もっと実験を重ねて確認される必要があるし，またその起因についても追究してみたい。特に実際の操業規模において，このような事象が起りうるものかどうかについての研究が特に重要であるように思われる。

この実験においては，横目方向荷重時に網目の経糸と緯糸の間には可成り明瞭な差異があるようにみられたが（表６），縦目方向荷重の場合には余り明白な傾向はみられなかった。そこで，脚糸応力の測定部位を図２に示すように限定して，６個の試料について実験を重ねたが，その結果は３．２．１の項に述べた通りである。

ここで特に注目したいことの一つは，CNY では荷重が増大するにつれて一つの網目の経糸と緯糸の応力の偏差割合が次第に小さくなるのに，DNY ではそれが逆に増大していくことである。このことは 3.1.2項 において述べた結節緊締度との関連において重大な意味を有するように思われる。すなわち，CN の結節緊定度は DNのそれに較べて35%も低い（図４）。この網目の滑り易さのために CN では荷重の増大とともに少しづつ脚糸の長さの偏差は少なくなり，脚糸間応力の偏差率も小さくなるものと推察される。標本網地破断後のその無破断部目

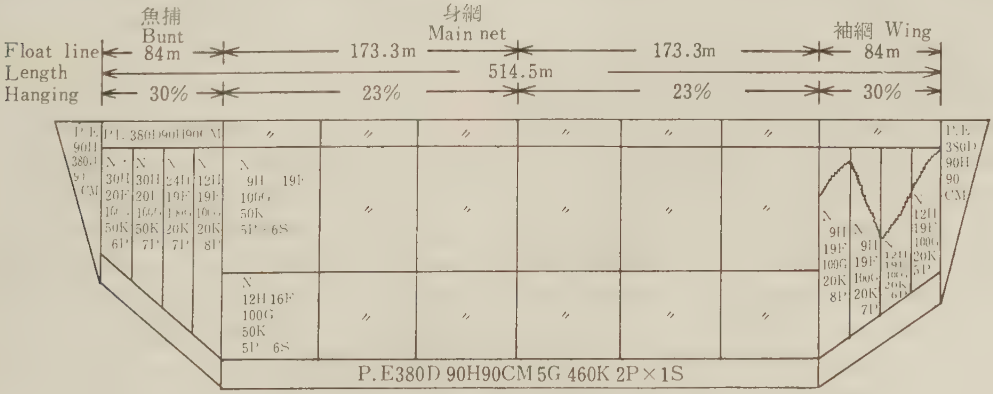

魚捕
Bunt
身網
Main net
袖網 Wing
Float line
Length
Hanging
84m
173.3m
173.3m
84m
514.5m
30%
23%
23%
30%
P.E 90H 380D 90 CM
PE. 380D90H90CM
N 30H 20F 100G 50K 6P
N 30H 20F 100G 50K 7P
N 24H 19F 100G 20K 7P
N 12H 19F 100G 20K 8P
N 9H 19F 100G 50K 5P・6S
N 12H 16F 100G 50K 5P 6S
N 9H 19F 100G 20K 8P
N 9H 19F 100G 20K 7P
N 12H 19F 100G 20K 6P
N 12H 19F 100G 20K 5P
P.E 380D 90H 90 CM
P.E380D 90H90CM 5G 460K 2P×1S

図 6　正常な鰮旋網の操業ミスから生じた破網例（1978）

Illustration of a normal mackerel purse seine brocken by an accident during operation.
N: Nylon, PE: Polyethylene, F:Fushi (Unit of mesh size), P: Pannel, H:No. of yarn, K: 1.503m approximately, G:Number of mesh in depth direction, CM: Centimeter.

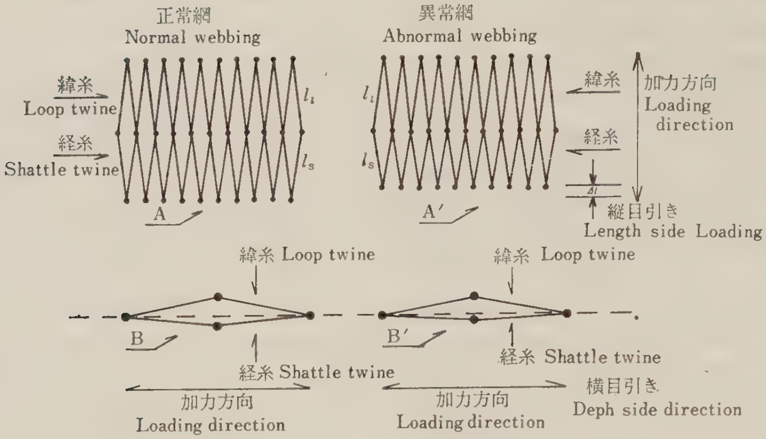

正常網
Normal webbing
異常網
Abnormal webbing
緯糸
Loop twine
経糸
Shattle twine
l_l
l_s
l_l
l_s
緯糸
経糸
加力方向
Loading
direction
Δl
縦目引き
Length side Loading
A
A′
緯糸 Loop twine
緯糸 Loop twine
B
B′
経糸 Shattle twine
経糸 Shattle twine
加力方向
Loading direction
加力方向
Loading direction
横目引き
Deph side direction

図 7　異状網の網目の性状

Properties of meshs of defective webbings compared.

合を測定してみると，表2のようになっていることに注目されるべきである。今後これを裏付けるためのもっと精確な測定実験によってこれを確めたい。

網地が縦目方向に荷重された場合に，CN では経糸と緯糸の応力の差は殆んどみられないのに，DN では両者間に差異がみられる。これは多分，CN では結節のづれによる脚糸調整がおこるのに，DN では結節がづれ難いために脚糸の長さに変動がおこりにくいことによるものと考えられる。この点については特に，将来標本網地の縮結の種々異なる実験などによって確めたい。

さて，破断した標本網地の破れ方では，3.3.2 の項で述べたように，CN 標本では斜めまたは山型の単純なパターンが多くみられたが，DN 標本では小破れの多い複雑なパターンが多く，しかも破れの方向は斜めよりも水平もしくは垂直を含むものが多くみられた。

実際の旋繰操業において，所謂事故網と称せられる網の破網は，例えば図5に示す鰮旋網漁船T丸でおこった破網のごとく，極めて短期間の間にかなり頻繁に大きな規模でほぼ水平方向および垂直方向に走破し，しかも網地全体に亘って小破れが点在するという特徴がある。これに対して，平素頻繁な破網事故がなく，何か特段の環境や特段の操業条件などの中で発生した破網事故では，図6に示されるように，破網パターンはその殆んどが単純な斜走または山型で，小破れは殆んどみられない。これらのことは本実験の DNとCN の破網パターンに極めてよく符号するもので興味深い。

CN と DN の破網パターンのこのような相異を今直ちに明確に立証することは困難である。しかし，本研究の今までの実験結果から或程度の推論をすることは出来るかも知れない。

DN では結節が強く緊締されており，経糸と緯糸との長さの偏差が大きい。網地にかかる荷重が増大していくと，CN では目づれにより両脚糸の長さの偏差が少なくなって同時にその応力差も減少して数%程度までになるので，両脚応力のアンバランスによる破網は起りにくいであろう。これに対し，DN では破網直前に両脚糸の応力差は10～35%にも達するので，両脚糸応力のアンバランスによる脚破断は CN に較べておこり易くなるであろう。小破れの発生が DN において多くみられるのはこの理由によるものと考えられる。

網目脚糸の破断が，小破れに止まる場合の外，連続的な脚糸の破断に通じる機構については本研究では明らかにすることが出来なかったが，小破れはこのような異常網では水平方向または垂直方向に連続して生じる可能性を推察することは可能である。

すなわち，蛙又網では経糸と緯糸の関係は 図7 A, A′ のようになっており，経糸は緯糸より必らず若干一様に短かく，したがって縦目方向に一様に網地を伸ばしたとき，経糸と緯糸は長脚と短脚の段を交互に形成している。したがって編成された経糸の脚糸が極端に短かいものが点在するときは，環締め或いは揚網の段階で種々な縮結で荷重を受けて両脚糸は図7 B, B′ にみられるような状態となるが，結節の固定が鞏固な場合には短い方の経糸が破断し小破れとなり，この小破れは水平もしくは垂直方向に出来易いのであろう。DN 標本において小破れが多くみられるのはこのためとみられ，これが連続した走りになるのであろうが，これらが水平におこり易い機構については今後更に実験を重ねて明らかにしたい。

またCN標本網地では凡そ80%以上，DN標本網地でも40〜65%程度の網地の斜め走破がみられるが，この違いの解明についても今後種々の角度から実験と理論的追究を行なっていきたい。

5. 結　　語

今回の実験においては，超小型のトランスデューサーを用いて，荷重した網地の網目の脚糸応力を測定し，経糸と緯糸の間の応力の差異がその脚長の差に起因するであろうことを明らかにした。そして正常網では荷重の増大につれて経糸と緯糸の応力偏差割合は減少していく傾向があるのに対し，事故網のような異常網では逆にその応力偏差率が増大する傾向があるが，これは結節が鞏固に固定され過ぎているためで，そのために網地に張力が加えられたときに一般的に破れ易く，しかも水平もしくは水平方向に小破れを生じ易いと推論した。

コントロール網標本と事故網標本の破断網についての調査では，前者は単純な斜め走破のパターンが多いのに対し，後者では複雑なしかも水平もしくは垂直方向への走破パターンが多くみられた。このような事象は実際の旋網操業における破網パターンとよく類似している。

今回の実験で，脚応力は荷重された網地の着力側でなく固定側で大きくなる傾向が強くみられたが，この点についての追究は今後に残されている。前述のように事故網では破網が複雑且つ水平，垂直的になるが，正常網では単純な斜め走破であるなど，破網の機構について未だ解明されるべきことが多く残されている。

文　　献

1)　下崎吉矩・大沢要一・武富一：事故網の特性について，東海水研報　76，1973.

2)　下崎吉矩・大沢要一：網地応力脚応力分布測定機の開発とその試験結果，水工研報　2，1981.

On the Breaking Properties of Defective Fishing Gear webbings

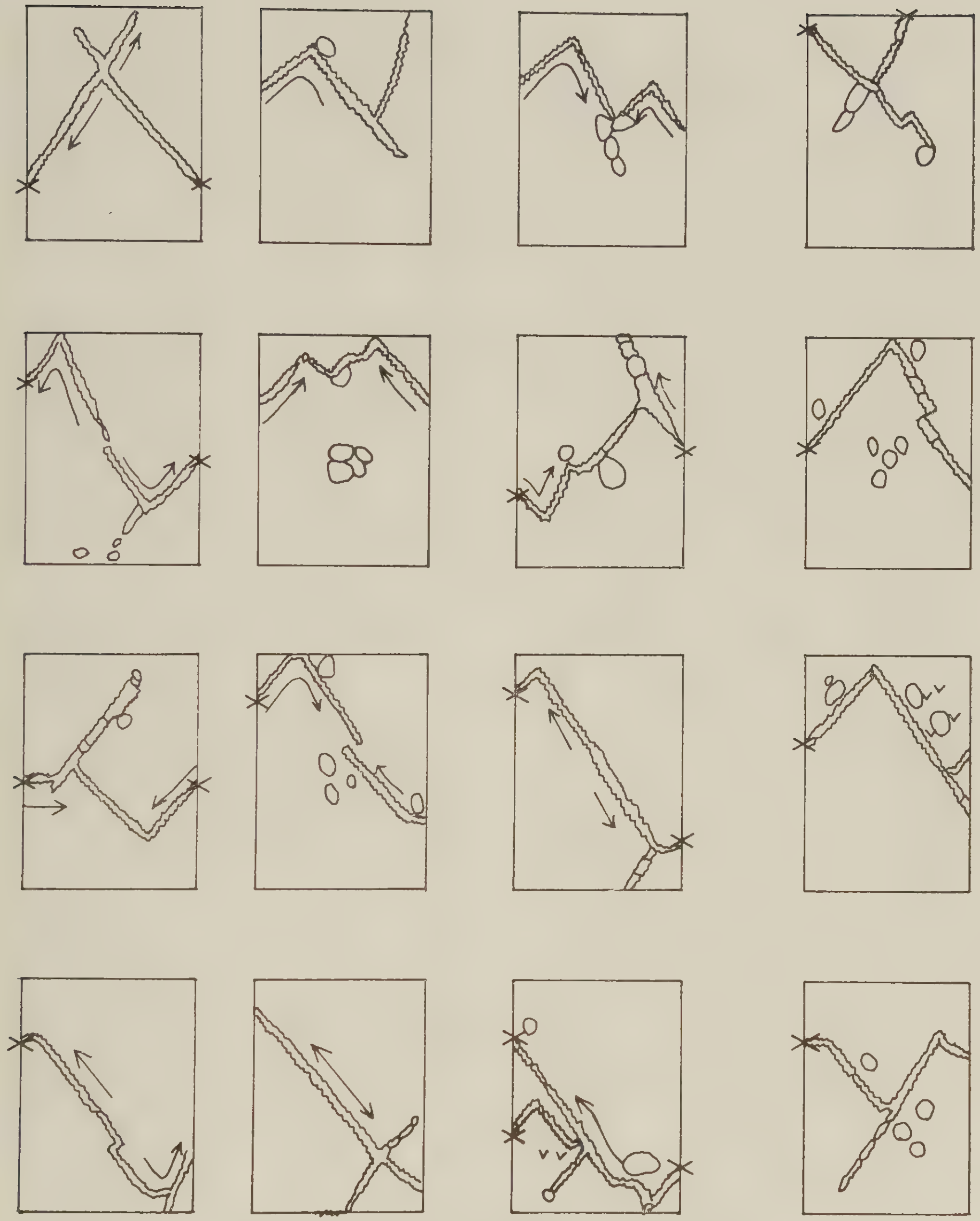
Yoshinori SHIMOZAKI, Susumu NISHIDA and Hajime TAKETOMI

Fitting a normal or a defective fishing gear webbing with 60% of hungging ratio to the experimental machine and giving them breaking load to the vertical direction, we determined their breaking stress and elongation and also investigated their pattern of the running bar of their broken webbings. And at the same time, we measured the stress of a shattle twine bar and a bobbin twine bar of a mesh in the sample webbing under increasing load and found out the difference between the both bar stress, by fitting sevral transducers on the bar of the sample webbings simultaneously.

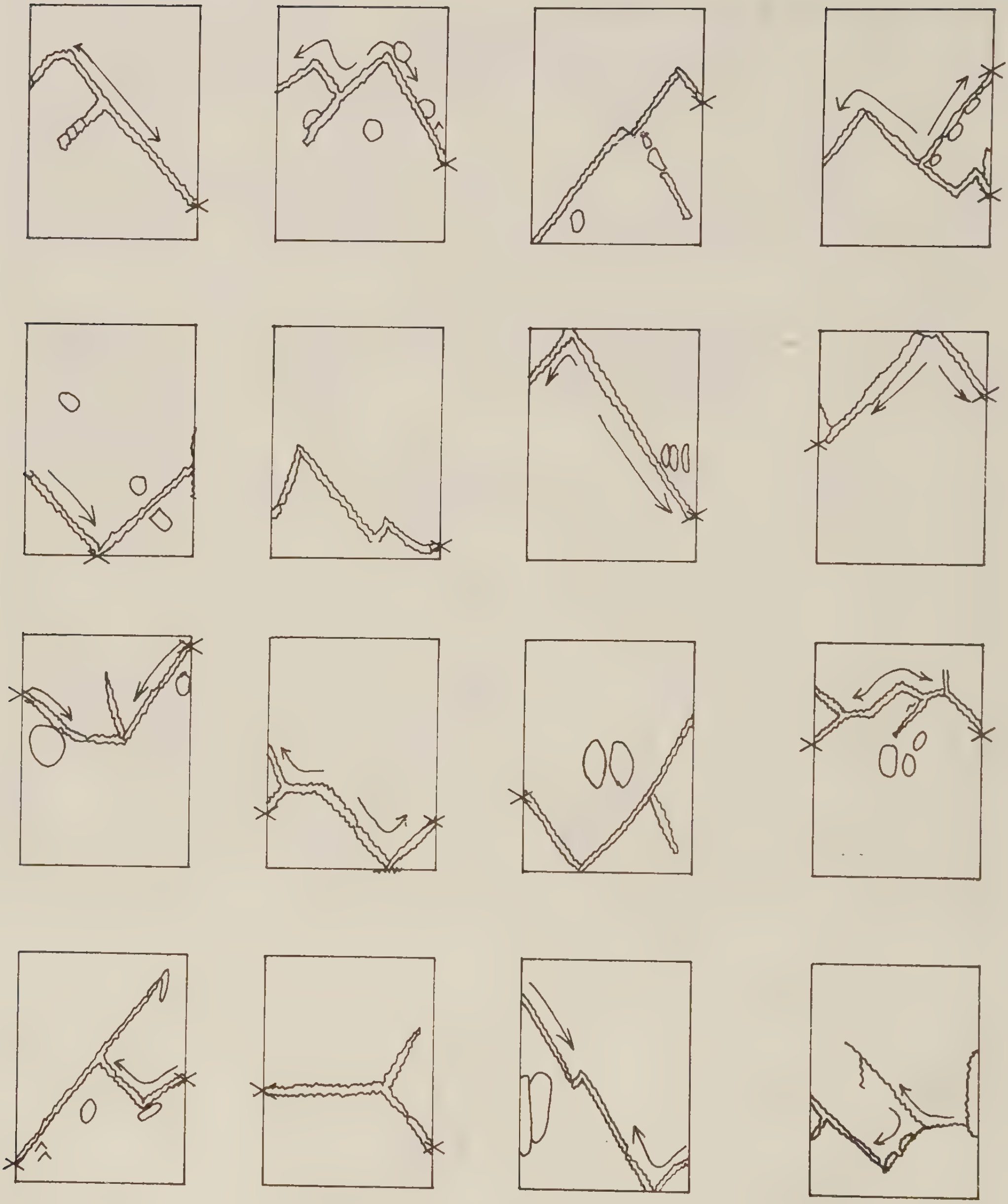
Results obtained from the experiments were as the following.

Tipical patterns of the trace of brocken bars in the normal sample webbings (CN) were simple and slanting run, but in the defective webbing (DN) were of complx shape including many small breakages and horizontal or vertical run. And it was shown that these patterns of net breakage were very similar with the real net-breakage caused in the actual fishing operation.

And also it was cleared that the ratioes of the stress beween a shattle twine bar and a bobbin twine bar decreased with increase of the load to the smple webbings when a control sample webbing (CN) was loaded, however the ratioes increased when a defective sample webbing (DN) was. A reasoning that this these defference between CN and DN were caused by the difference in the degree of knot fixation was given by the determination and was supported with the result of the measurment on the knot slip resistance of the both webbings.

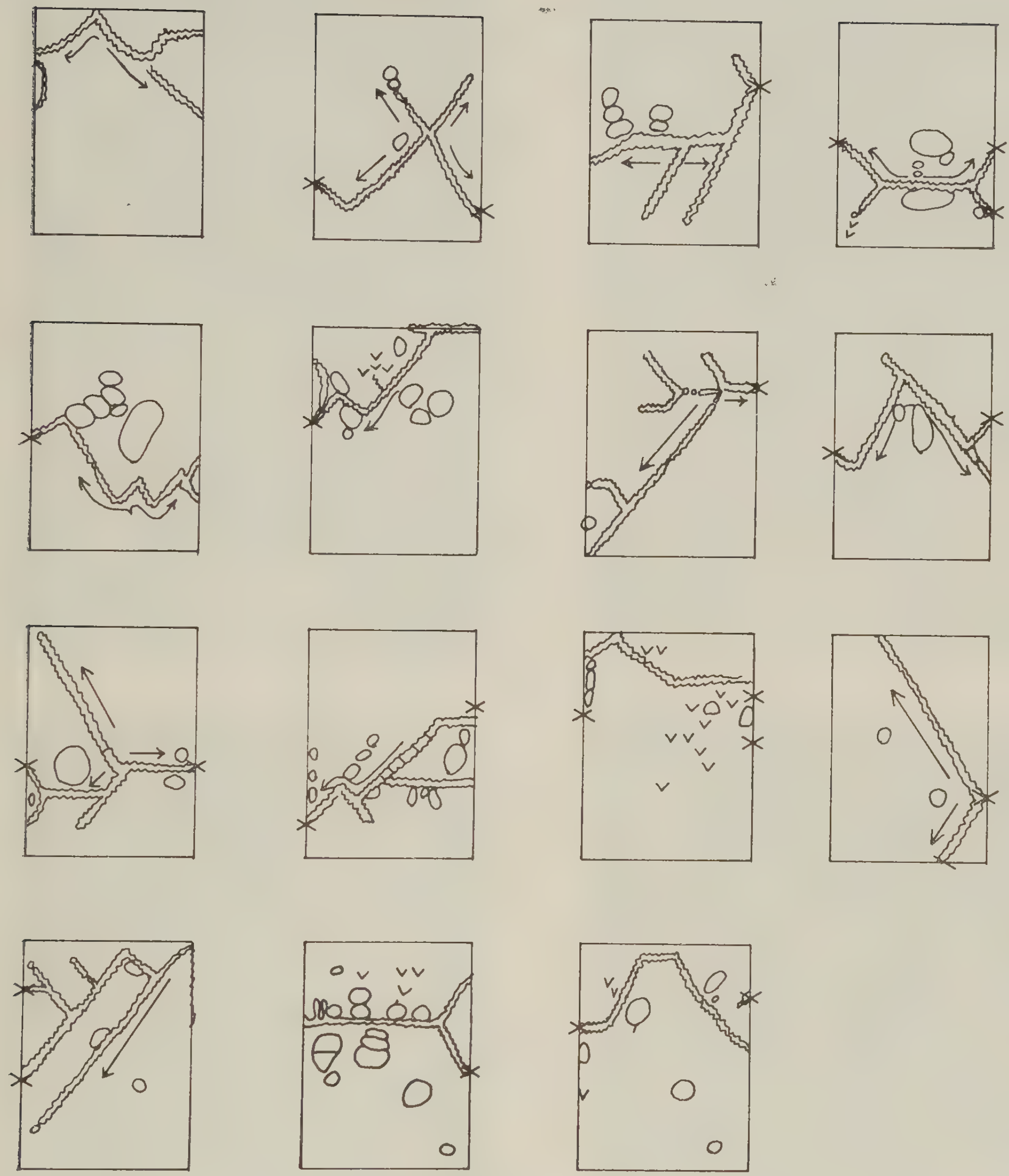


付図　1　CNTの破網パターン
Running pattern of brocken bar of the CNT samples

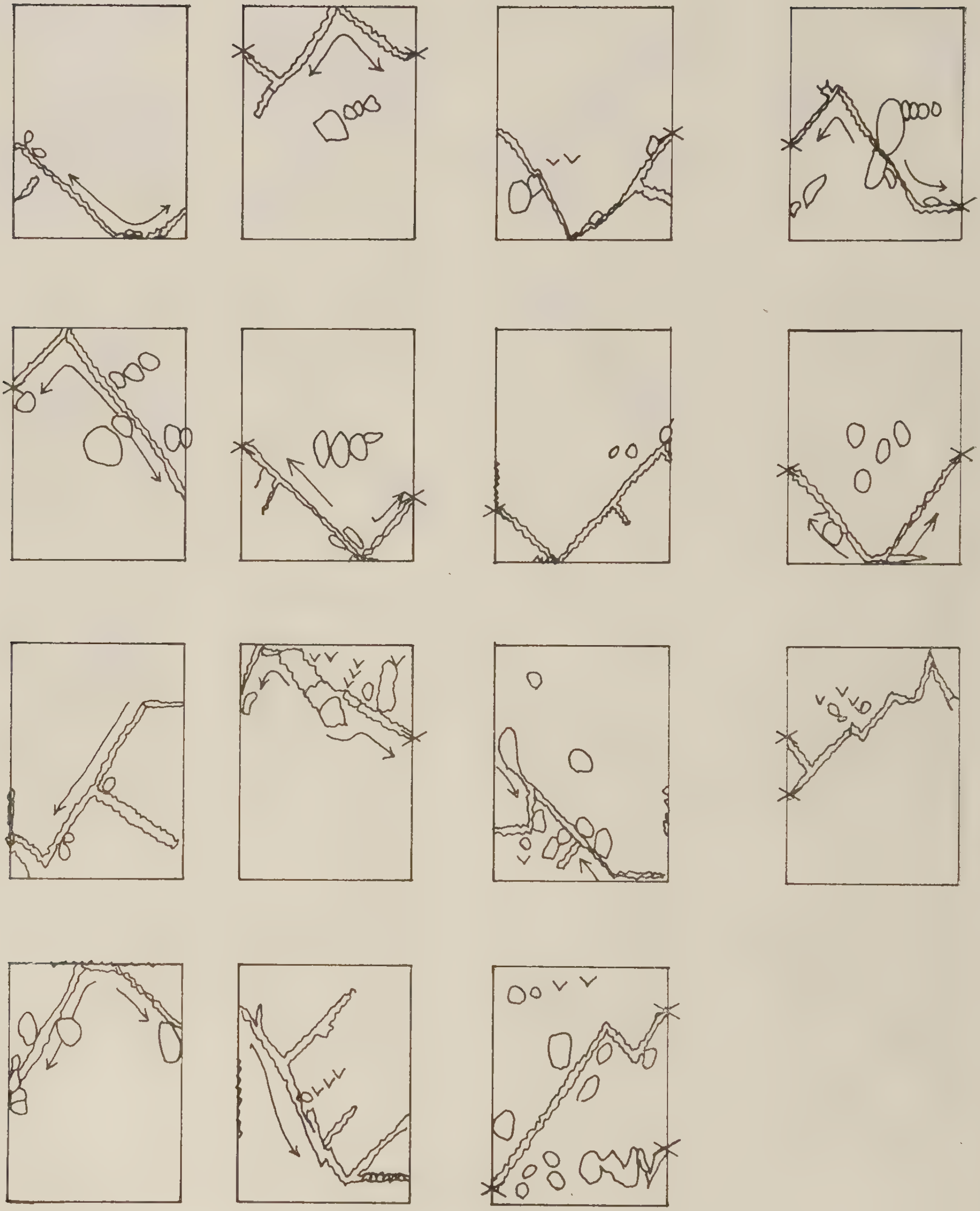


付図 2　CNYの破網パターン

Running pattern of brocken bar of the CNY samples



付図 3 DNTの破網パターン
Running pattern of brocken bar of the DNT samples



付図 4 DNYの破網パターン
Running pattern of brocken bar of the DNY samples

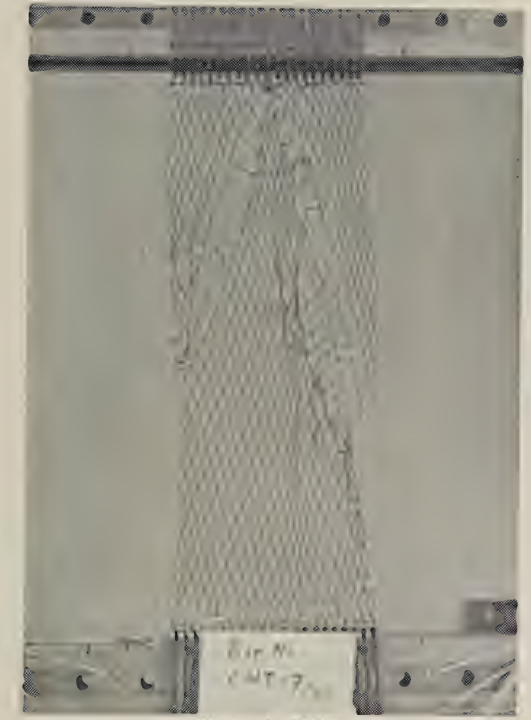


Plate-Ⅰ CNT

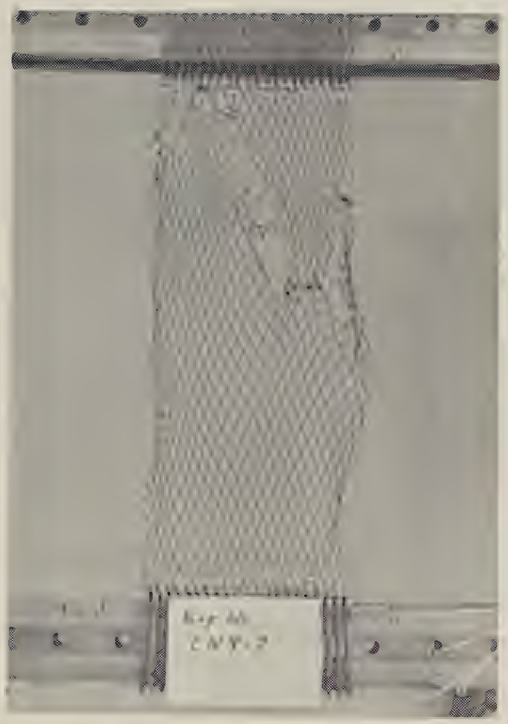


Plate-Ⅱ CN

Typical pattern on brocken ber of CNY sample.

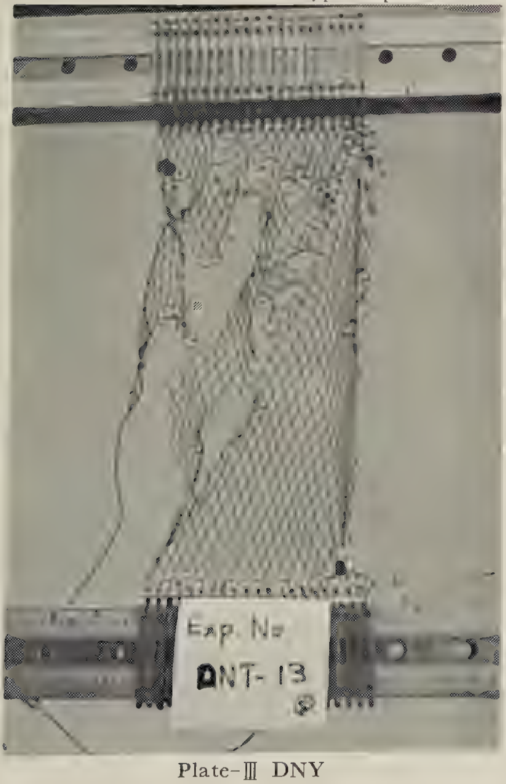

Exp. No
DNT-13

Plate-Ⅲ DNY

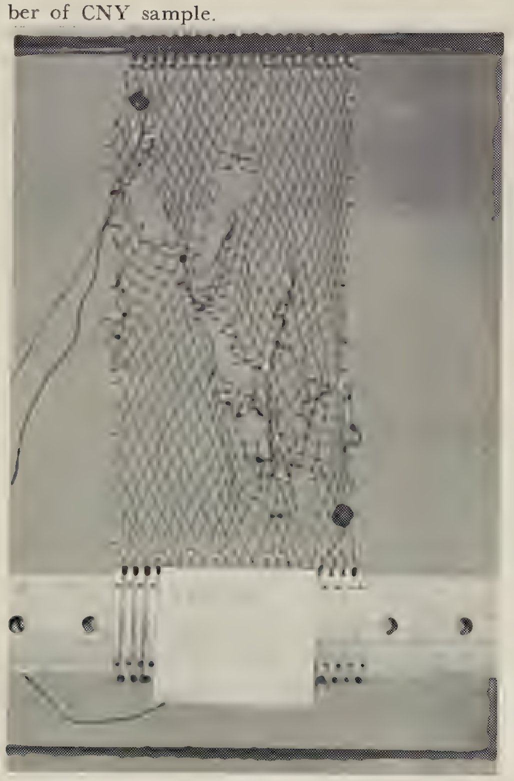


Plate-Ⅳ DNY

Typical pattern of brocken bar of DN sample

水工研報告　3
1982 pp. 213～226

スキャンニングソナーによる定置網に対する魚群行動調査の試み

田原陽三*・井上喜洋**・森敬四郎*

目　　次

1. 緒　言……………………………………………… 213
2. 調査の方法………………………………………… 213
3. 調査の結果………………………………………… 213
4. 今後の問題点……………………………………… 218
5. 参考文献…………………………………………… 225
Summary ……………………………………………… 226

1. 緒　　言

定置網に対する魚群行動は目視観察，標識放流，魚群探知機，バイオテレメトリーなどにより調査が行われて来たが，何れの方法でも魚群の行動を把握することは困難で充分な結果を得るに至っていない。そこでスキャンニングソナーにより定置網に対する魚群行動の基礎資料を得ることを目的として本調査を試みた。尚本調査は漁業生産工学部，神奈川県水産試験場相模湾支所および神奈川県定置漁業研究会が協同して行った。

2. 調査の方法

調査船（「たか丸」，約50屯，水工研所属）にスキャンニングソナー（KSS-180，海上電機製）を装備して，図1に示すように定置網の垣網の前面150m～200mの所に固定し，定置網の前面の魚群の行動を約10日間昼夜連続して調査した。

図2に調査システムの概略を示す。

スキャンニングソナーの送受波器は将来「たか丸」以外の船（例えば県水試の調査船，定置網漁場の網船など）でも調査が出来るように昇降装置を取り外して出来る丈小型軽量化して舷側装備にした（写真1）。

スキャンニングソナーのブラン管上に表示される映像は刻々と変化し消えてしまうのでビデオレコーダー（ビデオカメラ：HVC-80，ビデオデジタルタイマー：VTG-33，ビデオデッキ：SL-J9，ソニー製）により録画した（写真2～3）。

録画した映像を再生して，約5秒間隔でスチールカメラで撮影し，これらの写真から魚群の行動を求めた。

使用したスキャンニングソナーの仕様の概略を表1に示す。

調査した漁場は図3に示すように相模湾の米神漁場（5月22日16時～26日10時30分），石橋漁場（5月26日12時～31日16時20分）の2漁場で調査を行った。

3. 調査の結果

3.1 調査可能範囲

スキャンニングソナーは従来旋網で使用されているが，旋網の場合は一般には漁場の水深が深いので海底の反射ノイズが問題になることは少い。しかし定置網漁場は水深が浅い（羽口で30～70mくらい）ので，時化た場合調査船の揺れが大きくなると超音波のビームが上下に揺れるため海底や海面からの反射ノイズが多くなり，ブラウン管上の映像の解読が困難となり魚群の判別が出来なくなる。

調査範囲を左右する要因としては超音波の周波数，出力，指向特性，パルス巾，ブラウン管の解像度などスキャンニングソナーの性能だけではなく，漁場の水深，海況（波浪，うねりなど），魚群の大きさ，魚体の大きさ，魚群の密度，魚群の游泳層，魚群と網地との間隔，網地の吹れなど数多くの要因がある。これらの要因は複雑に組合され，変化するので調査可能範囲は大幅に変化する。

今回の調査結果では大ざっぱに見て好条件の場合は調査船を中心に半径250m～300mの円内が調査可能であるが，普通は半径200mくらいまでの円内である（図1）。

---

* 漁業生産工学部
** 神奈川県水産試験場相模湾支所

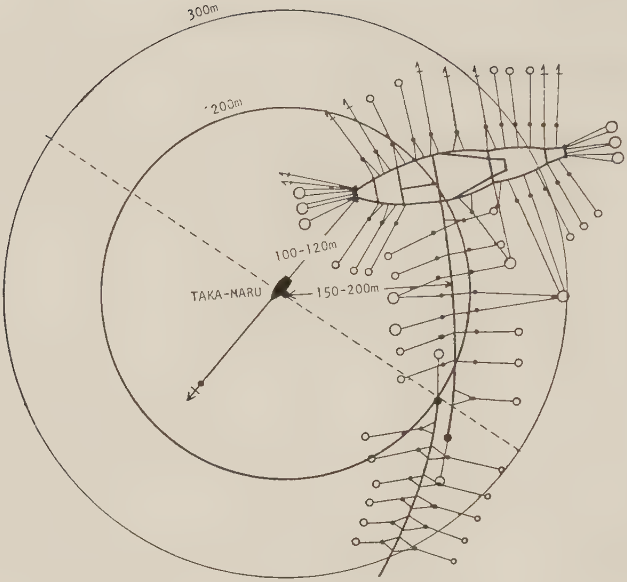

300m
200m
100-120m
TAKA-MARU
150-200m

図 1　調査船の設置位置と調査範囲
半径 200m 内を主な調査範囲とし，調査可能範囲は約 300m，180° スキャンニングで±175°旋回可

Fig. 1. Anchoring position of resarch vessel and survey range. Surveyable rang by scanning sonar: within radius of 300m of vessel, usually within 200m at 180° in scanning and ±175° in rotation

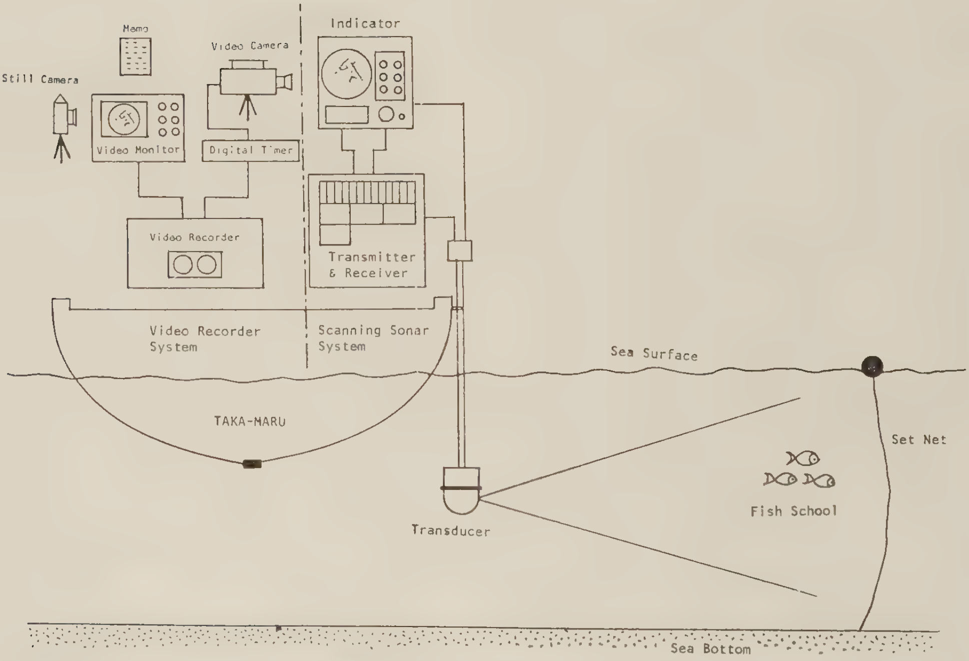

Memo
Still Camera
Video Camera
Indicator
Video Monitor
Digital Timer
Video Recorder
Transmitter & Receiver
Video Recorder System
Scanning Sonar System
Sea Surface
TAKA-MARU
Set Net
Fish School
Transducer
Sea Bottom

図 2　調査システムのブロックダイアグラム

Fig. 2. Block diagram of survey system

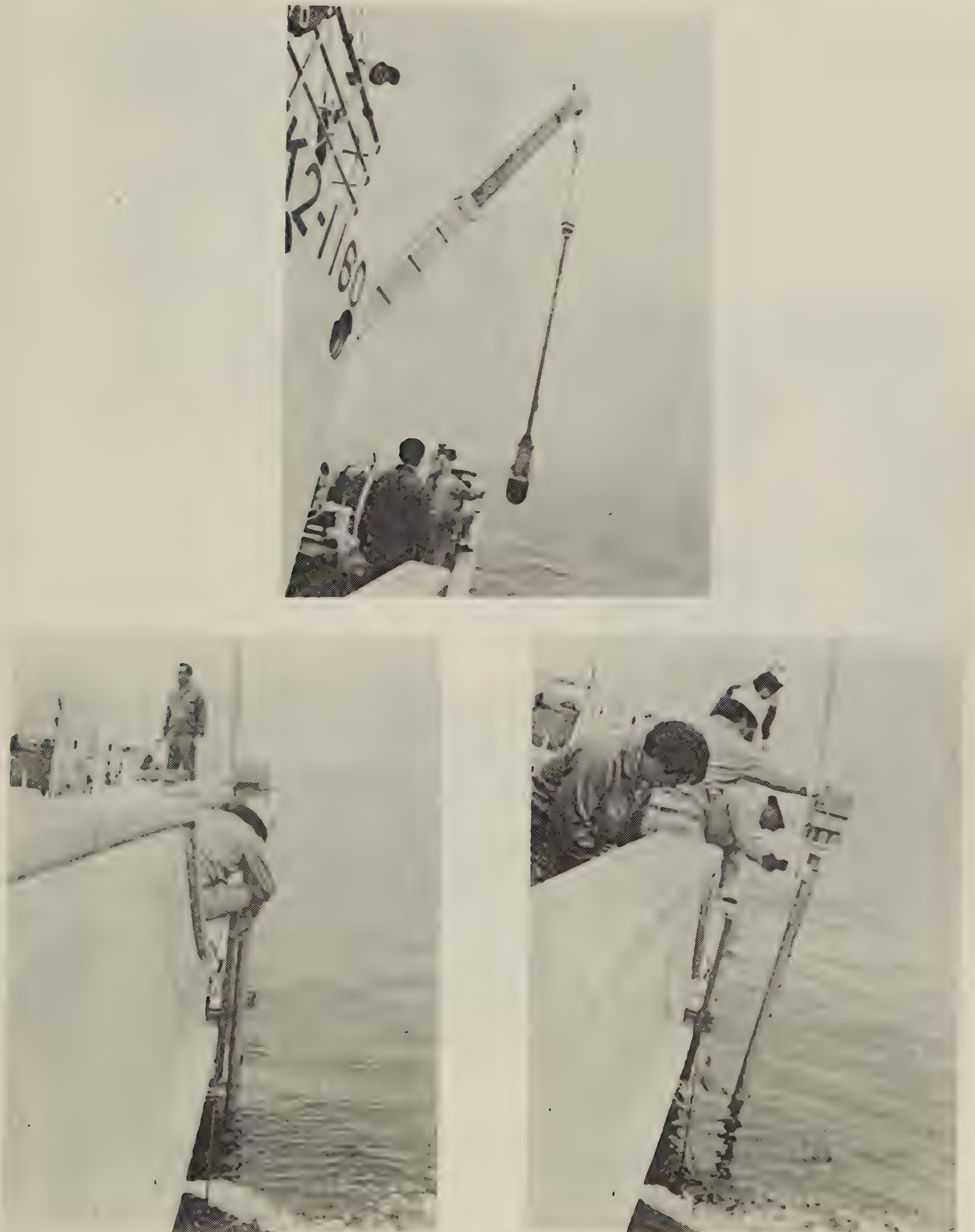


写真 1 送受波器の取付
Photo 1. Fixing of transducer

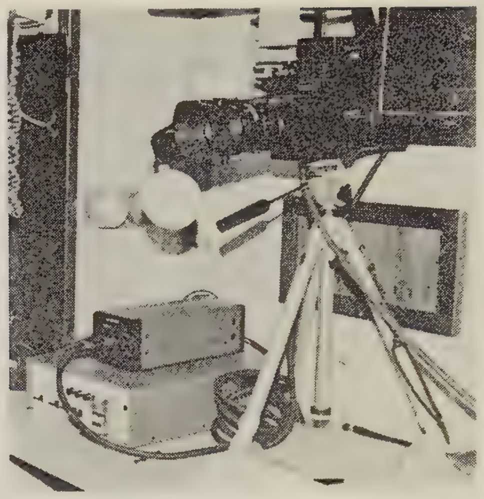


写真 3—1　ビデオカメラ（右）
デジタルタイマー（左下）
カメラアダプター（左上）

Photo 3-1. Video camera (right)
Digital timer (bellow left)
Camera adapter (upper left)

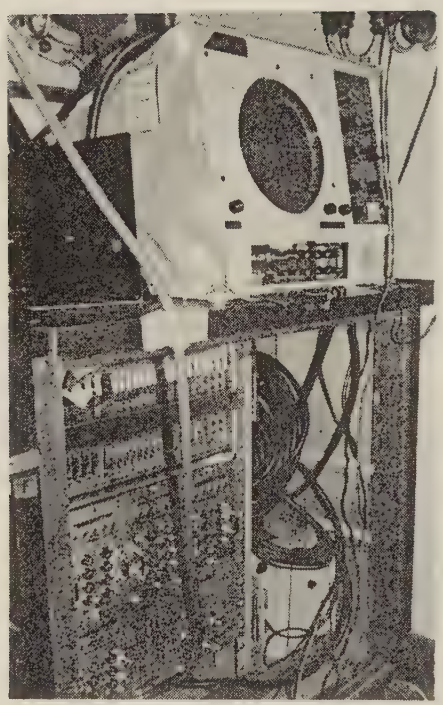


写真 2　スキャンニングソナーの
指示器（上）送受信器（下）

Photo 2. Unit of scanning sonar
Indicator (upper)
Transmitter and receiver (bellow)

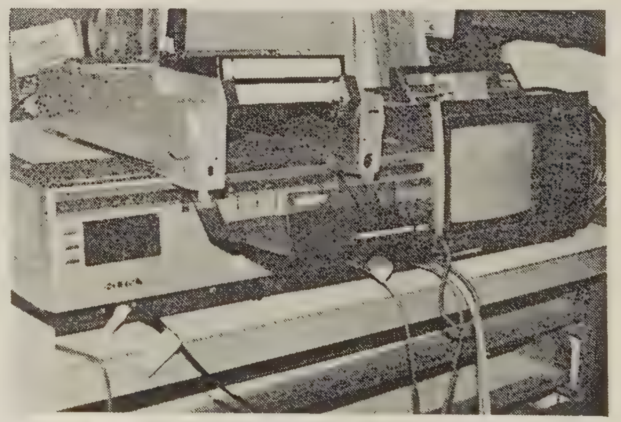


写真 3—2　ビデオカセットデッキ（左）
ビデオモニター（右）

Photo 3-2. Video cassete deck (left)
Video monitor (right)

Table 1. Specification of scanning sonar, KSS-180

Indicator	Cathod-ray tube	180° scanning, with A-scope Rotating angle : ± 175°
Range	0 - 63m, 0 - 125m, 0 - 250m, 0 - 500m, 0 - 100m, 0 - 200m, 0 - 400m, 0 - 800m in off-center	
Transmitter	Output power	5kw
	Pulse length	0.5 - 10ms
Transducer	Frequency	160kHz
	Directivity	Transmitting angle : 180° (horizontal) 7° (verttical) Receiving angle : 7° (horizontal, vertical)
	Rotating angle	± 175°
	Tilting angle	0° - 90°
Electric power	100V, 60Hz, about 500VA	

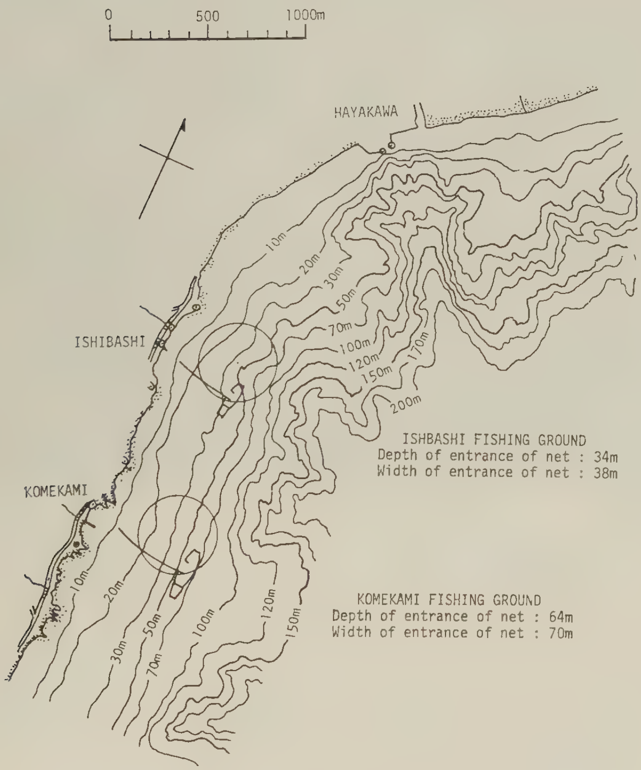

0
500
1000m
HAYAKAWA
ISHIBASHI
KOMEKAMI
10m
20m
30m
50m
70m
100m
120m
150m
170m
200m
ISHBASHI FISHING GROUND
Depth of entrance of net : 34m
Width of entrance of net : 38m
KOMEKAMI FISHING GROUND
Depth of entrance of net : 64m
Width of entrance of net : 70m

図 3 漁場図

Fig. 3. Fishing ground

3.2　魚群の行動

調査期間中両漁場とも魚群の来游が少く，数多くの魚群の映像が得られなかったが，今迄不明であった魚群の行動を知る幾つかの貴重な映像が得られた。これらの映像から求められた定置網前面に於ける魚群の行動を例示する。漁獲からみてイワシ，アジ魚群の行動と考えてよいであろう。

1）　出網魚群

写真4，図4に出網魚群例を示す。この例でも見られるように一度羽口から入網した魚群でも羽口から出網することがしばしばあると思われる。網内での行動は不明であるが，箱網あるいは登網内にいたと思われる魚群が揚網後登網側の障子網先端附近から羽口中央部を通り運動場側の障子網に添い（15〜20mくらいの間隔で）出網し，そのまま垣網に添って（40〜50mくらいの間隔で）約200m磯に向ったが，その後は海底ノイズのため不明である。平均游泳速度は0.92m/sec（約1.8ノット）であった。

2）　入網魚群

写真5，図5に入網魚群例を示す。羽口から約140m磯側，垣網から約20〜25mに現われた魚群はゆっくり羽口に向っている。羽口に近づくにつれて次第に垣網から離れてはいるが（約50〜60m），運動場側の障子網すれすれに羽口を通過し入網している。平均游泳速度は0.43m/sec（約0.8ノット）で出網魚群より可成り遅い。

3）　入網せずに逸れる魚群

写真6，図6に示すように垣網に添い沖側に向った魚群でも垣網への接近が不充分で台の方に逸れて入網しないことがある。羽口から約120m磯側，垣網から約50mに現われた魚群は沖に向ったが，次第に垣網から離れて運動場の横切りの外側から台の方へ逸れてしまった。平均游泳速度は0.68m/sec（約1.3ノット）で出網魚群よりやや遅い。

4）　一部入網，一部逸れて入網しない魚群

写真7，図7に魚群の一部しか入網しないで一部は逸れて入網していない例を示す。前記の三例でも游泳中に群形が変ることはあるがこの魚群は特に群形が変ったり，群が別れたり複雑な動きをしている。垣網に添う魚群は従来垣網に平行してほぼ縦隊で羽口に向うものと思われていたが，この例では游泳中に群形が変り，垣網に対して斜め横隊になり羽口に向っている。またこの横隊の群が3群に別れ，垣網側の1群のみが入網し他の2群は羽口の手前で台の方へ向い逸れて入網していない。游泳速度も部分的にまちまちであるが，全般的に遅い。

以上が今回得られた特徴ある魚群の行動であるが，何れの漁場でも游泳水深は10〜30mくらいが多く，魚群の来游は夜間殆んど見られず14〜17時頃に多かった。

今回の調査では魚群が少かったので結論めいたことはいえないが，従来の方法では得ることが出来なかった貴重な知見が得られた。魚群の行動が解明されれば魚群の行動を考慮し定置網の設置位置の選定，漁具の改良に大変役立つものと思われる。

スキャンニングソナーによる定置網に対する魚群行動調査も決して完全とはいえないが，従来の鉛直式魚探機やサーチライト式ソナーによる方法より広範囲の調査が容易である上に魚群の移動状態も連続的で明瞭である。

魚群の来游は予測することが困難であるのでこの方法は根気強く魚群の来游を待たねばならないという問題がある。バイオテレメトリーは魚を追って記録を求めるのでデーターは比較的容易に得られるが，果して自然の魚群の行動であるかについては多くの問題がある。スキャンニングソナーで得られる映像は自然の魚群の行動と考えて良いであろう。スキャンニングソナーによる方法も上記のように問題は残されてはいるが，現段階では定置網に対する魚群行動調査を行うには最も良い方法の一つではないかと考えられる。

4.　今後の問題点

魚群の行動は同一魚種であっても時期，時刻，場所，海況，魚の成長段階，魚群の大小など種々の要因によって可成り複雑に変化するものと思われる。従って種々の条件下に於けるデーターを集めることが必要である。

今回の調査で気付いた問題点を列記すると

1）　調査船が何時でも安心して簡単に掛れて，しかも風波などの影響が少なく船の移動が出来る丈少いような掛りを工夫する。

2）　専用の小型調査船（例えば網船，小型の双胴船あるいはイカダ式など）により省力化する。

3）　水深が浅く，海況条件の良くない漁場では海底や海面の反射ノイズが少くなるよう調査船の設置位置を工夫する（例えば調査船を網に近づけ余り調査範囲を欲張らないこと，浅い方から深い方を見るようにする)。

4）　指示器で得られた映像をビデオカメラを通さずに直接録画するように受信器にビデオ出力回路をつける。

5）　録画された映像をスチールカメラで写す方法以外にビデオプリント方式を工夫する。

6）　魚群位置の読取り方法を工夫する。

7）　リモートコントロール方式の開発。海上に送受波器のみを設置し，陸上で映像が得られるようにして，送

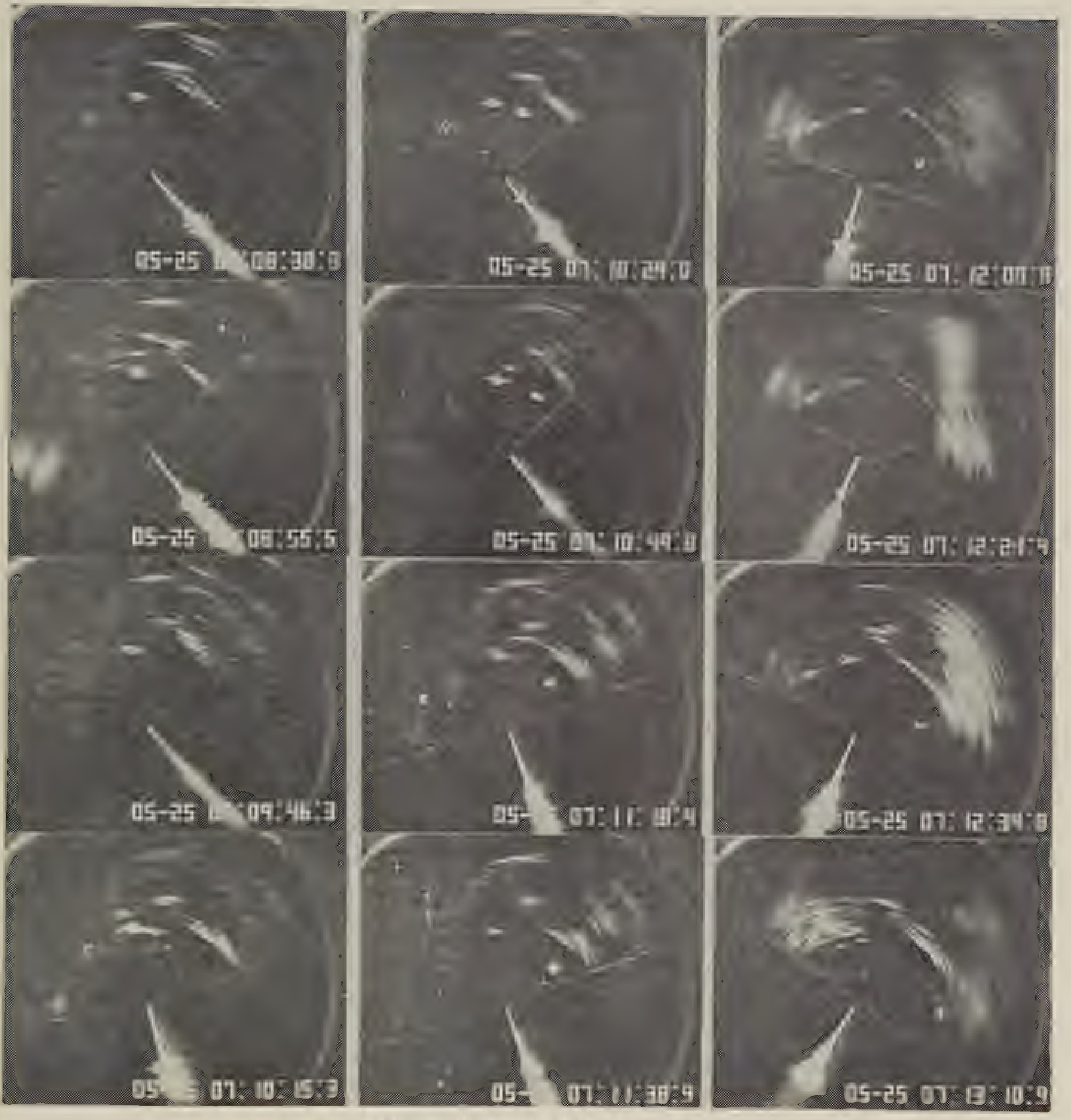

05-25 08:30:0
05-25 07:10:29:0
05-25 07:12:00:8
05-25 08:55:5
05-25 07:10:44:0
05-25 07:12:21:4
05-25 09:46:3
05- 07:11:10:4
05-25 07:12:34:8
05- 07:10:15:3
05- 07:11:38:9
05-25 07:13:10:9

写真 4　出網魚群（[illegible]，86—5—25）
Photo 4.　Fish going out of net

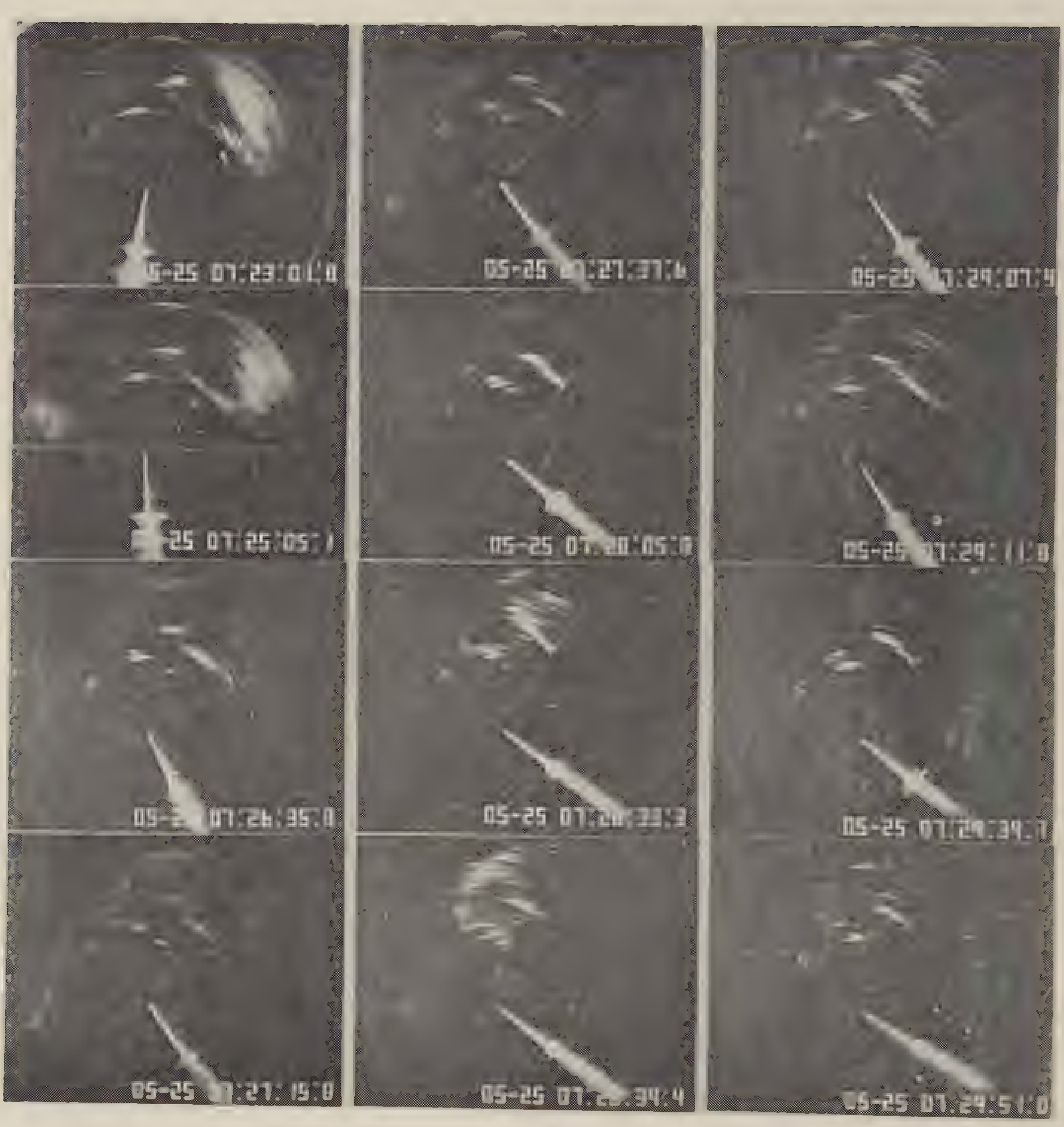


写真 5 入網魚群（米神，56—5—25）
Photo 5. Fish entering net

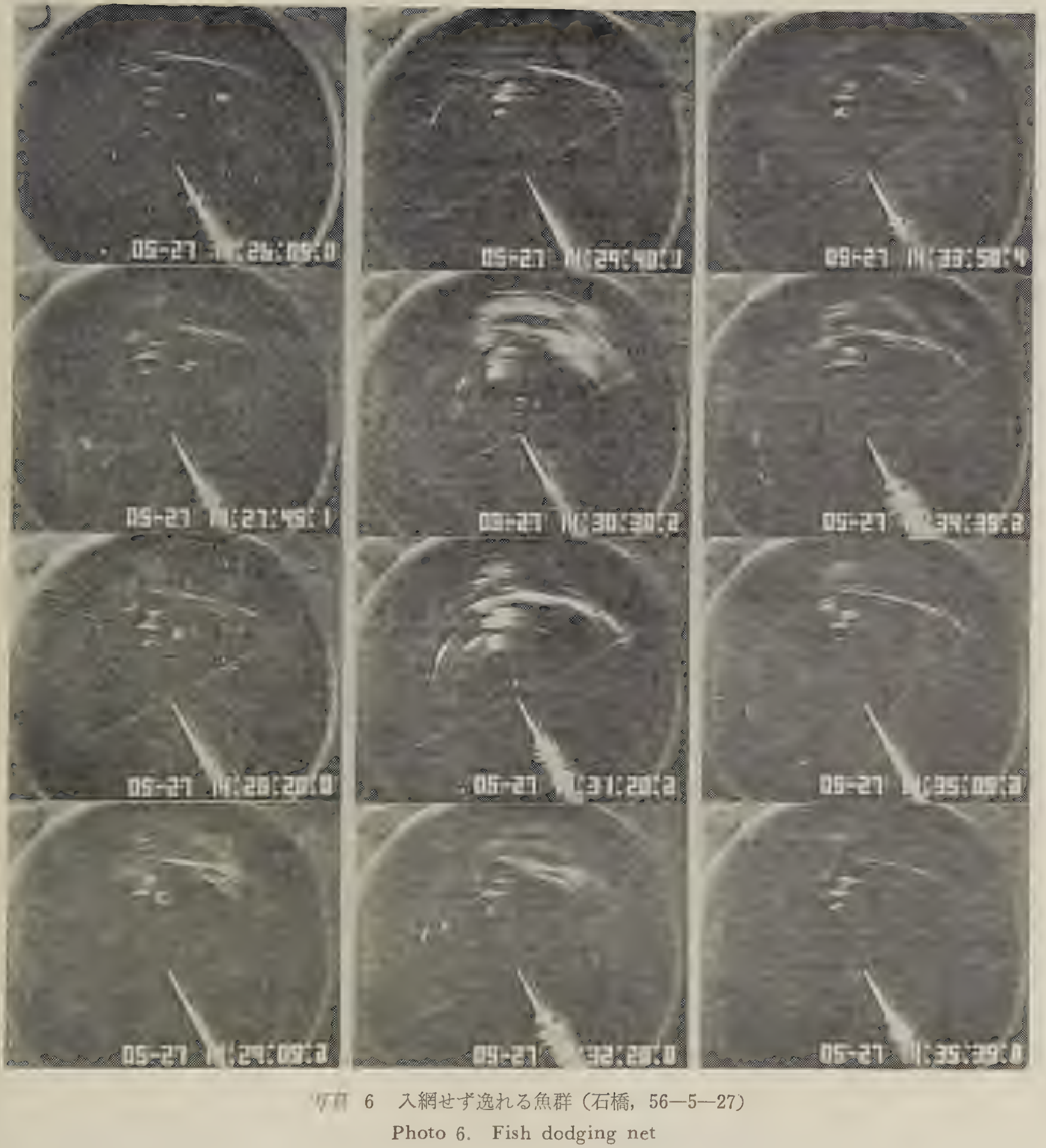

05-27 11:26:09:0
05-27 11:27:49:1
05-27 11:28:20:0
05-27 11:29:09:0
05-27 11:29:40:1
05-27 11:30:30:0
05-27 11:31:20:2
05-27 11:32:20:0
05-27 11:33:50:4
05-27 11:34:39:8
05-27 11:35:09:0
05-27 11:35:39:0

写真 6　入網せず逸れる魚群（石橋，56—5—27）
Photo 6.　Fish dodging net

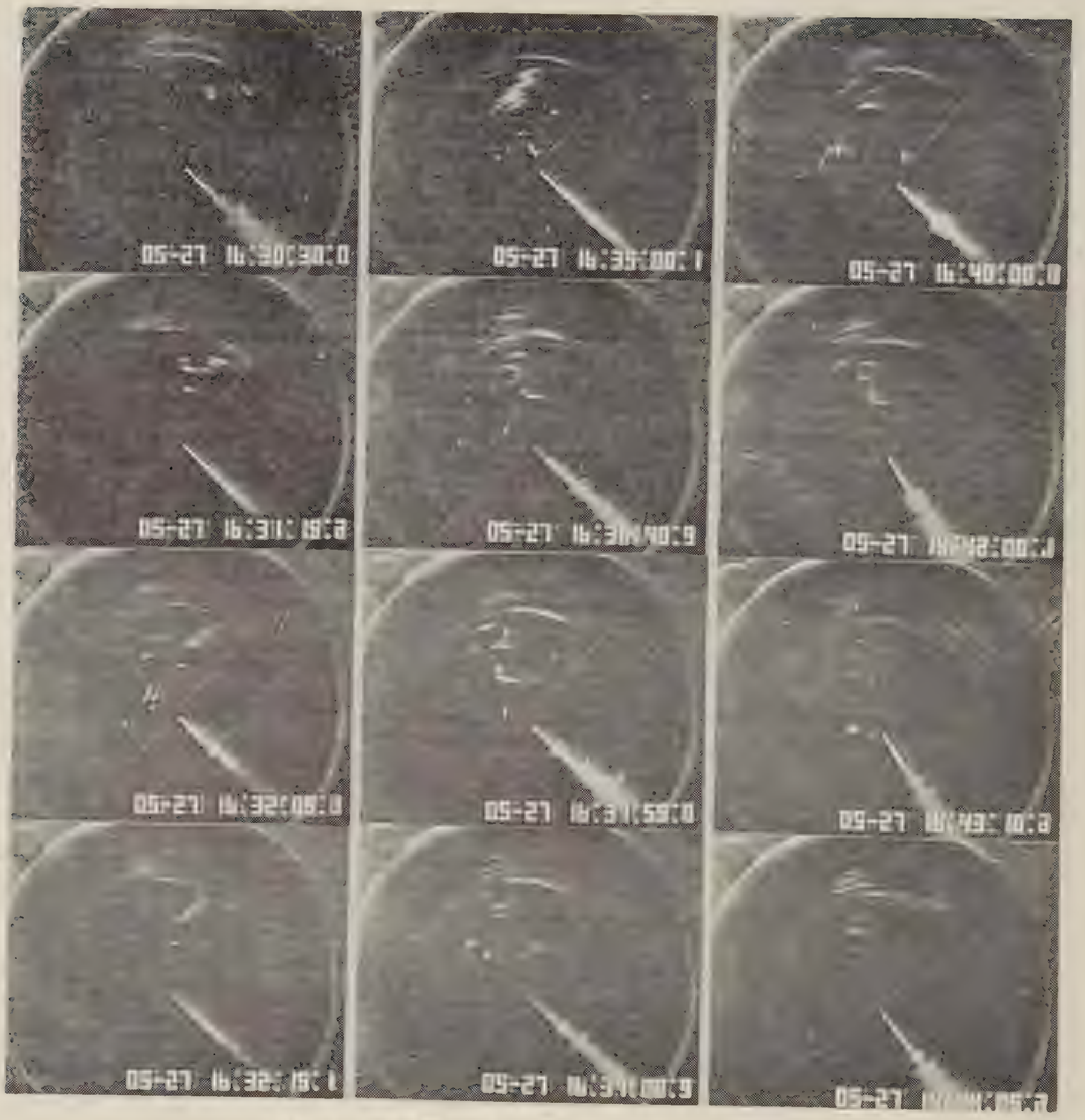
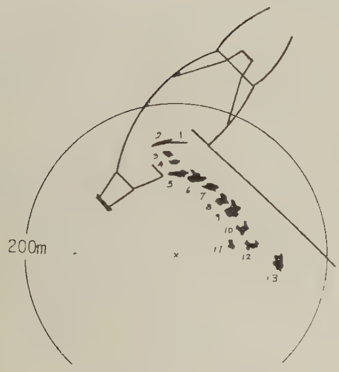

05-27 16:30:30:0
05-27 16:40:00:0
05-27 16:32:08:0
05-27 16:31:59:0
05-27 16:32:15:1

写真 7　一部入網，一部逸れる魚群（石橋，56—5—27）

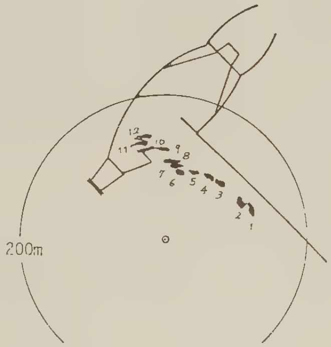
Photo 7. Some fish entering net, some dodging it



No.	Time	Time passed	Moving distance	Swimming speed
	h m s	sec	m	m/sec
1	07.08.30	26	18.3	0.70
2	07.08.56	50	17.1	0.34
3	07.09.46	13	15.3	1.18
4	07.09.59	16	15.9	0.99
5	07.10.15	9	18.3	2.03
6	07.10.24	25	21.4	0.86
7	07.10.49	29	22.0	0.76
8	07.11.18	21	16.5	0.76
9	07.11.39	21	24.5	1.17
10	07.12.00	21	24.0	1.14
11	07.12.21	14	22.6	1.61
12	07.12.35	36	41.6	0.88
13	07.13.11			
		281	257.5	0.92

図 4 出網魚群（米神，56—5—25）

Fig. 4. Fish going out of net



No.	Time	Time passed	Moving distance	Swimming speed
	h m s	sec	m	m/sec
1	07.23.01	43	15.3	0.36
2	07.23.44	81	39.7	0.49
3	07.25.05	36	12.2	0.34
4	07.25.41	55	21.4	0.39
5	07.26.36	40	18.3	0.46
6	07.27.16	22	11.0	0.50
7	07.27.38	27	6.1	0.23
9	07.28.33	38	18.0	0.47
10	07.29.11	28	9.8	0.35
11	07.29.39	12	7.9	0.66
12	07.29.51			
		410	178.0	0.43

図 5 入網魚群（米神，56—5—25）

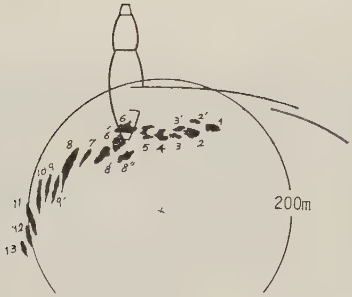
Fig. 5. Fish entering net

受波器の俯角や旋回など総てのコントロールが陸上で出来るようにする。

これは技術的にも予算的にも容易でないと思われるので指示器だけでも陸上に揚げてモニタリングが出来るように工夫する。

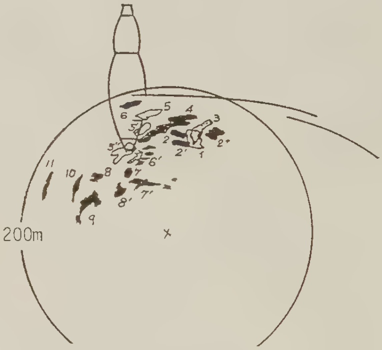
これらの問題点は簡単に解決出来ないものもあるが，長期間のデーターを得るためには種々の面で省力化を検討する必要がある。

本調査を行うに当って協力をいただいた相模湾支所の宮田所長，中村科長，平元専門研究員，神奈川県定置漁業研究会の方々，ビデオ装置その他色々と協力をいただいた東京水産大学の有元先生に深謝致します。また色々と助言をいただいた漁業生産工学部矢島部長，昼夜連続調査に協力をいただいた「たか丸」戸部船長，上原機関長他乗組員の方々に深謝致します。



No.	Time h m s	Time passed sec	Moving distance m	Swimming speed m/sec
1	14.26.09	31	28	0.90
2	14.26.40	65	25	0.38
3	14.27.45	35	25	0.71
4	14.28.20	45	25	0.56
5	14.29.05	35	42	1.20
6	14.29.40	50	43	0.86
7	14.30.30	50	38	0.76
8	14.31.20	60	30	0.50
9	14.32.20	50	30	0.60
10	14.33.10	40	33	0.83
11	14.33.50	45	28	0.62
12	14.34.35	30	20	0.67
13	14.35.05			
		536	367	0.68

図 6　入網せず逸れる魚群（石橋，56—5—27）
Fig. 6.　Fish dodging net



No.	Time h m s	Time passed sec	Moving distance m	Swimming velocity m/sec
1	16.30.30	45	Fish formation changes from ● to ◡	
2	16.31.15	50	Fish formation changes from ◡ to ／	
			Fish head for entrance in oblique line	
3	16.32.05			
4	16.32.15	70	40	0.61
			Fish divide into 3 groupes toward entrance ／ → ⋰	
5	16.35.00	105	35	0.33
			Only one of 3 groupes enter net from entrance	
6	16.36.40	100	30	0.30
7	16.37.55	75	35	0.47
8	16.39.00	65	40	0.61
9	16.40.00	60	30	0.50
10	16.43.10	140	32	0.17
11	16.44.05	55	40	0.73

図 7　一部入網，一部逸れる魚群（石橋，56—5—27）
Fig. 7.　Some fish entering net, some dodging it

参考文献

1) 田原陽三；定置漁業と魚群探知機，さかな No.3，1969

2) 川田三郎・田原陽三；定置網漁場に於ける魚道測量の一つの試み（予報），日本水産学会誌.Vol.24，No.6，7，1958

3) 野沢靖・間庭愛信・田原陽三；尾鷲け湾にる於ける魚道調査，尾鷲湾ダム調査報告書，1960

4) 田原陽三；定置網漁場に於ける魚道調査，ていち No.29，1964

5) 田原陽三；魚群探知機から見た定置網漁場に於ける魚群の行動—I，ていちNo.32，1967

6) 田原陽三；魚群探知機から見た定置網漁場に於ける魚群の行動—II，ていち No.54，1978

A trial for observing with Scanning Sonar Fish Behavior toward Set Net

By

Yozo TAWARA, Yoshihiro INOUE and Keishiro MORI

Summary

A number of observations of fish behavior toward a set net have been carried out in various methods, but non of good results has so far been obtained.

In order to get basic data on the fish behavior twoard a set net, a trial was made with a scanning sonar.

The research vessel Taka-maru, 50 tons, equipped with a scanning sonar was anchored for 10 consecutive days from May 21 to May 31, 1981 in front of a set net to observe fish behavior around it (Figs. 1 and 2, Photos 1, 2 and 3).

Results :

1) As the fishing ground of the set net is shallow (30m to 70m), strong wind pitches and rolls the Taka-maru, making lots of reflectional noises from the sea surface and the bottom and making it difficult to decipher the images on the cathod-ray tube, but in calm weather fish can be observed with a scanning sonar within a radius of 250m to 300m of the vessel, usually such a survey is made within a radius of about 200m of the vessel (Fig. 1).

2) It would be too hasty to draw the conclusion from the present investigation of fish behavior toward the set net, because there were not an enough number of fish schools coming in and out of the set net.

But as photos 4 to 7 show, interesting image of fish have been recoreded, which had not been available before. The behavior of fish swimming in front of the set net has been revealed to some extent (Figs. 4 to 7).

As mention above, though the scanning sonar is by no means perfect in seeing fish behavior, it can simultaneeously and consecutively detect fish in a wider range clearly and gets the behavior of moving fish, which the conventional fish finder, vertical type one and searchlight type sonar could not.

Recently a biotelemetric method has also been being employed for observing fish, but it is doutful whether or not it can catch the behavior of normal movements of fish.

The scanning sonar is thought to show the behavior of natural and normal movements of fish. The problem with the sonar, however, is to wait partiently for fish to come to the set net.

It is assumed that behavior of fish, though in same species, complicatedly varies to a great extent by season, time, place, sea condition, developmental stage of fish and size of fish school etc., so we need to collect as many such data as possible.

水工研報告　3
1982 pp. 227～238

平面網地の流水抵抗に関する研究 I

――網地抵抗測定装置の試作と貫通式無結節平面網地の流水抵抗の測定結果について――

大沢要一*・森　敬四郎*・田原陽三*

目　　次

1.　緒　言 …… 227
2.　網地抵抗測定装置 …… 227
　2.1　網地抵抗測定装置の原理 …… 227
　2.2　網地抵抗測定装置の特徴とその構造 …… 228
3.　貫通式無結節平面網地の流水抵抗測定結果 …… 233
　3.1　実験材料 …… 233
　3.2　実験装置および方法 …… 233
　3.3　平面網地の抗力係数(C_D)と揚力係数(C_L) …… 234
　3.4　貫通式無結節平面網地の抗力係数(C_D)の測定結果 …… 234
　3.5　貫通式無結節平面網地の揚力係数(C_L)の測定結果 …… 236
4.　結　語 …… 237
　参考文献 …… 237
　Summary …… 238

1.　緒　　言

網漁具が流れから受ける流水抵抗の大きさをその設計図面から推定する方式を開発することは漁具を設計する上で重要な研究課題の一つとされている。この課題を解決するための基礎となる平面網地の流水抵抗の研究については，これまで，寺田等，三宅，田内，宮本等，野村・森，藤田，宮崎，鈴木等，野々田，小長谷等，今井などの多くの研究者により多方面に亘り続けられて来た。本研究では，おもに実用上必要な平面網地の抵抗係数の測定に重点を置いて研究を進めた。今回は，今後に予定されている一連の実験に備えて，平面網地の流水抵抗を高精度に測定できる網地抵抗測定装置の試作を行なうとともに，この網地抵抗測定装置の性能を検証するため，その装置を使用して貫通式無結節平面網地の抵抗係数の実測を行なった。

本実験を行なうに当たって，網地抵抗測定装置の製作を担当された三真製作所並びに実験に使用した網地の提供に御協力下さいました函館製網船具株式会社に深謝するとともに，実験および論文作製に御協力下さいました上原亥之助氏，小嶋良子氏，広田直哉氏等に謝意を表します。

2.　網地抵抗測定装置

2.1　網地抵抗測定装置の原理

網地抵抗測定装置は一種の二分力計であり，図1はその測定原理を模式的に示したものである。文中の支柱とはパイプとパイプの内側に通されたシャフトとが1体化したものの総称である。支柱の上端はジンバル（Gimbals）部に接続しており，その下端には網張り枠が取り付けられている。支柱の下端に力が掛かるとジンバル部の働きにより支柱はジンバル軸を中心に前後，左右いずれの方向にも自由に回転できるように設計されている。一方，支柱の下端付近においては2個のロードセルによって，支柱は垂直方向に支持されている。

このうちの一個のロードセルは流れの方向と平行にセットされており，流れ直下方向の流水抵抗の成分（抗力）を検出する目的に使用されている。他の1個のロードセルは流れの方向に対して直角にセットしてあり，流れに対して直角方向の流水抵抗の成分（揚力）を検出する目的に使用している。

網張り枠には1枚の網地がたるみがなく，自然に伸びた状態で張り付けてある。網張り枠に流れが当たりその中心に流水抵抗が掛かると，これら2個のロードセルには網張り枠の中心に掛かる抗力および揚力に比例した大

---

* 漁業生産工学部

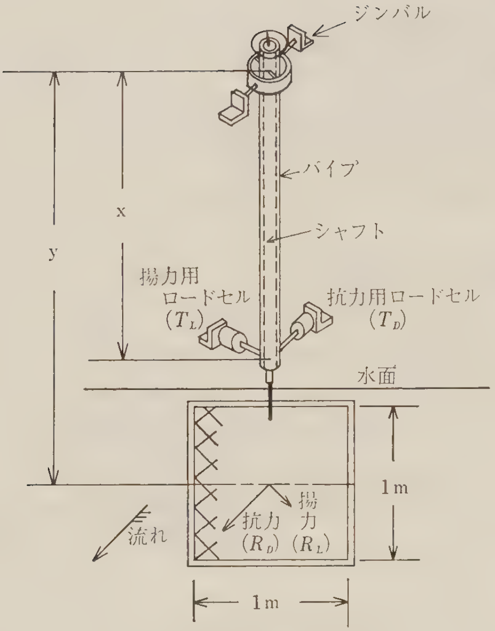


図 1　網地抵抗測定装置の模式図
Drawing of the apparatus to measure the hydraulic resistance of plain nets

きさの荷重が働く機構になっている。網張り枠の中心に掛かる揚力および抗力の値は2個のロードセルに掛かる荷重の大きさから，次式により計算できる。

いま

T_D：抗力成分検出用ロードセルに掛かる荷重(kgw)

T_L：揚力成分検出用ロードセルに掛かる荷重(kgw)

R_D：網張り枠の中心に掛かる抗力(kgw)

R_L：網張り枠の中心に掛かる揚力(kgw)

x：ジンバル軸の中心からロードセルの中心までの距離(m)

y：ジンバル軸の中心から網張り枠の中心までの距離(m)

とすると

$$R_D=\frac{T_D \cdot x}{y} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$R_L=\frac{T_L \cdot x}{y} \quad \cdots\cdots (2)$$

となり，T_DとT_Lとが実測できればR_DおよびR_Lは(1)，(2)式から計算できる。

また，平面網地に働く揚力および抗力の算定は次の方法で行なうことができる。初めに，網張り枠に実験網を張り，網地抵抗測定装置を使用して網地付きの網張り枠の揚力と抗力とを測定する。次に，別途に網張り枠の揚力と抗力とを測定する。そして，同一流速における両者の測定値から，任意の流速における平面網地の揚力および抗力は(3)，(4)式を用いて計算される。

平面網地の揚力＝（網地付きの網張り枠の揚力）－（網張り枠の揚力）　……………………………（3）

平面網地の抗力＝（網地付きの網張り枠の抗力）－（網張り枠の抗力）　……………………………（4）

2.2　網地抵抗測定装置の特徴とその構造

網地抵抗測定装置は，①　網地抵抗測定装置本体，②　網張り枠，③　記録装置　の三つの部分から構成されている。

この装置では張り枠の形状を適当に工夫すれば，網地ばかりでなく，ロープや生簀網模型の揚力および抗力の測定も可能である。今回試作した網地抵抗測定測置の特徴を列記すると，次のとおりである。

①　網地抵抗測定装置本体は水槽の曳航台車上に設置するので装置の軽量化を計る必要がある。このため，装置の材質にはアルミニュームを多く使用した。

②　実験中に，網張り枠に発生する造波抵抗を除去するため，網張り枠を水面下一定の位置に設置する必要がある。このため，装置本体に昇降装置を設け，網張り枠を上下350m/mの位置まで昇降できるようにし，網張り枠の水面下の位置を自由に設定できるようにした。

③　実験中に，流水抵抗が網張り枠に掛かると，パイプ内のシャフトがねじれて，迎角の値に若干の誤差が生ずる恐れがある。これを防止するため，「網張り枠旋回クランプ金具」の取り付け位置を支柱の下端に設定し，この位置でシャフトをパイプに固定するように設計した。これによって，シャフトのねじれを最小量に押えることができた。

次に網地抵抗測定装置本体の構造であるが，図2および図3にその上面図と側面図とを示した。その全体構造についてはすでに2.1において概要を述べたので，ここではその細部構造に限定して説明することにする。

まず，ジンバル部は船舶用コンパスに使われているものと原理的にほぼ同じ構造となっている。図4はジンバル部の組立て図面である。図から明らかなように，左右2本のジンバル軸により，ジンバルリングは装置本体の立枠に支持されており，さらに前後2本のジンバル軸によりジンバルスリーブはジンバルリングに支持されている。これら4本のジンバル軸にはいずれもベアリングが取り付けられているので，ジンバルリングはジンバル軸を中心に図面の前後の方向へ自由に回転でき，ジンバルスリーブもジンバル軸を中心にして左右の方向へ自由に

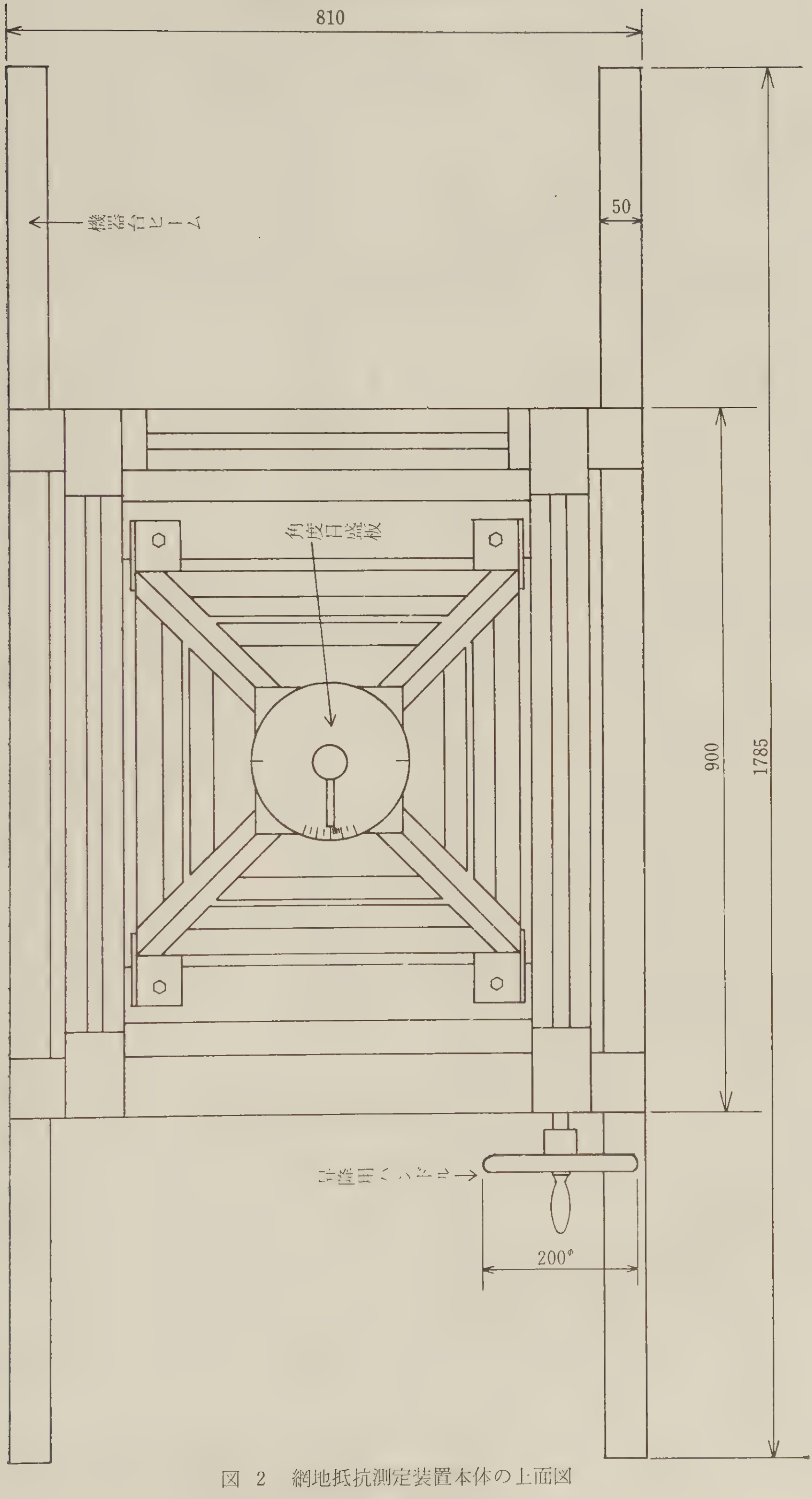

810
50
機器台ビーム
角度目盛板
900
1785
昇降用ハンドル
200φ

図 2　網地抵抗測定装置本体の上面図

Top view of the apparatus to measure the hydraulic resistance of plain nets

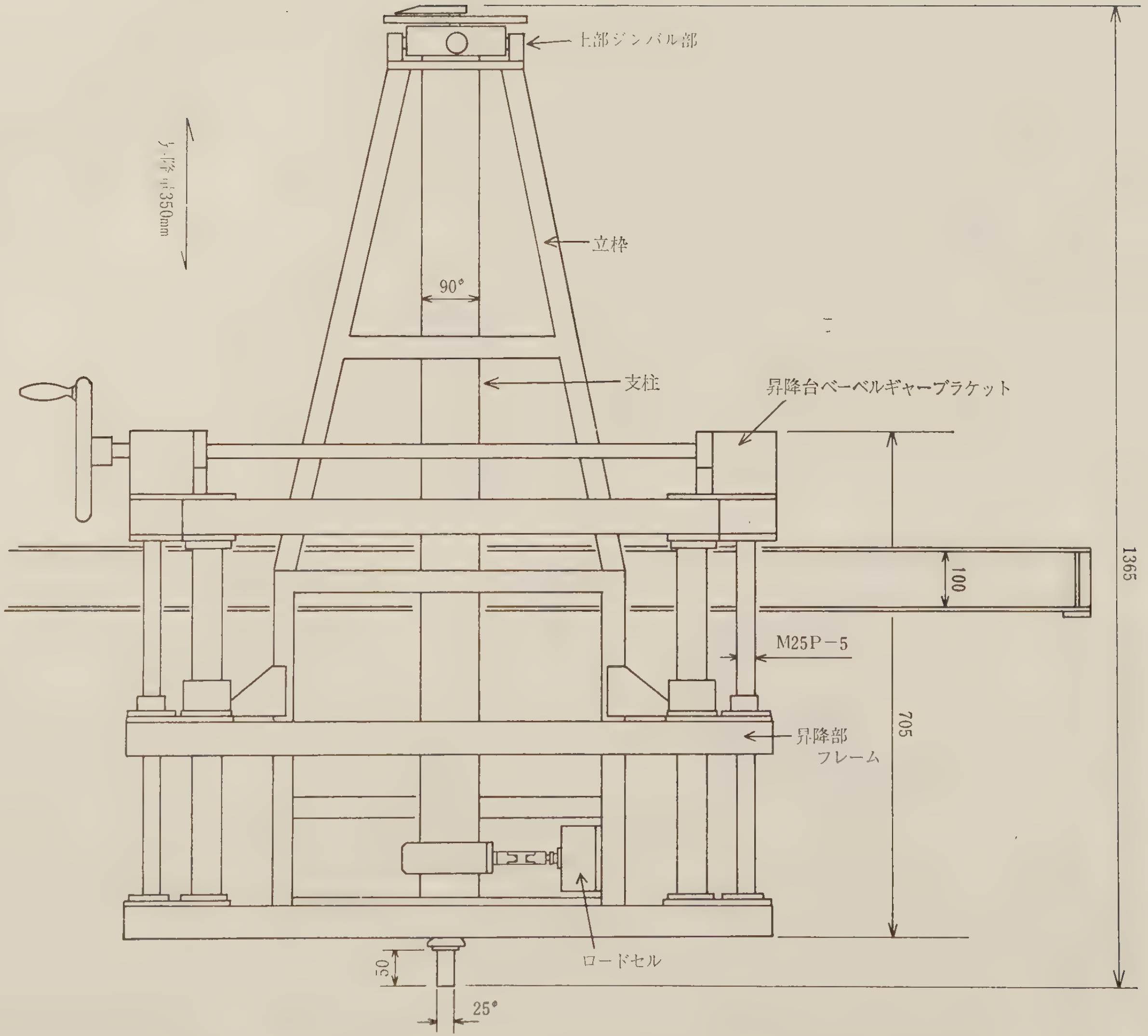

上部ジンバル部
昇降巾350mm
立枠
90°
支柱
昇降台ベーベルギャーブラケット
100
1365
M25P－5
705
昇降部
フレーム
ロードセル
30
25°

図 3 網地抵抗測定装置本体の側面図

Side view of the apparatus to measure the hydraulic resistance of plain nets

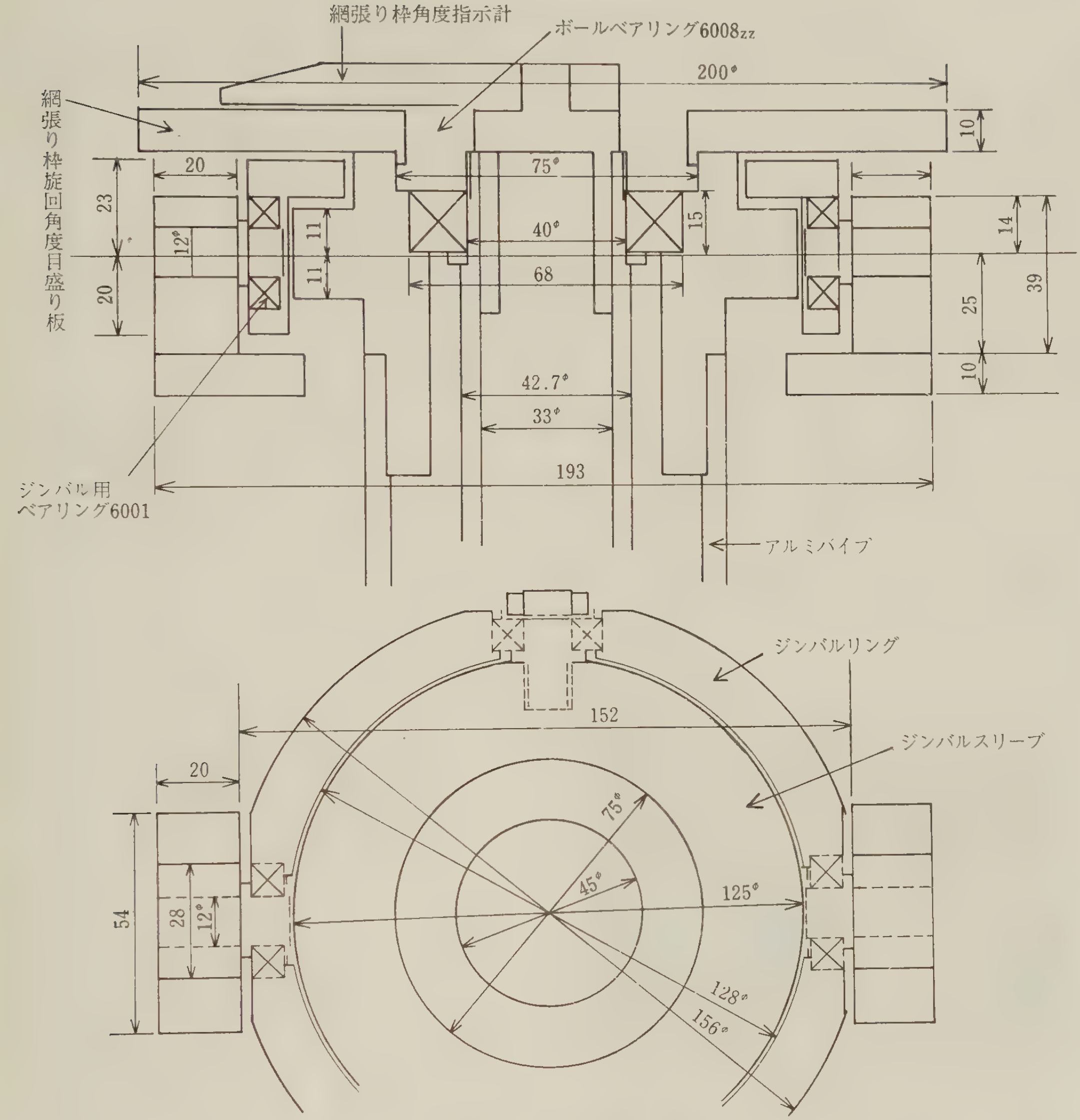

網張り枠角度指示計
ボールベアリング6008zz
200φ
網張り枠旋回角度目盛り板
10
20
23
12φ
11
11
20
75φ
40φ
68
15
14
39
25
10
42.7φ
33φ
193
ジンバル用ベアリング6001
アルミパイプ
ジンバルリング
152
ジンバルスリーブ
20
54
28
12φ
75φ
45φ
125φ
128φ
156φ

図 4　ジンバル部の組立て図面
Drawing of the gimbals part

回転できる機構になっている。したがって，支柱の下端に力が働くと，支柱はジンバル軸を中心にいずれの方向へも回転できる仕組みになっている。

次に，図5はロードセル取付部の組立て図面を示したものである。図より明らかなように，ロードセルの底面は装置本体の立枠にネジ止めされており，その感応部の側はユニバーサルジョイントを介して，ネジでパイプに固定されている。ロードセルを装置本体にセットする際に，パイプとロードセルとの間に歪が発生する恐れがあるので，ユニバーサルジョイントを使用してこの歪を除去した。また，図中の「網張り枠旋回部クランプ金具」はシャフトをパイプに固定するために使用される金具であり，網張り枠の迎角を設定する際に次のように操作される。まず，このクランプ金具に付いているネジを緩めて，シャフトをパイプからフリーな状態にする。次にジンバル部上面に取り付けられている「網張り枠角度指示計」を廻わしてシャフトを回転し，網張り枠を任意の迎角に設定する。そして再び，クランプ金具のネジを締め

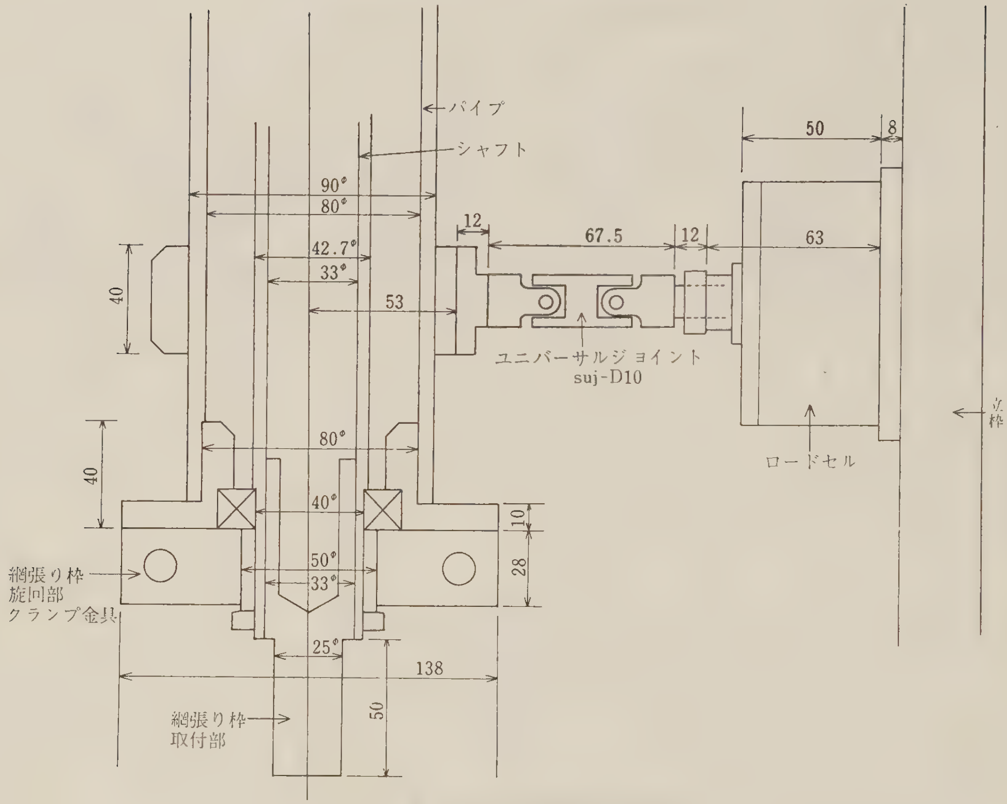

パイプ
シャフト
90φ
80φ
42.7φ
33φ
53
40
12
67.5
12
63
50
8
ユニバーサルジョイント
suj-D10
立枠
ロードセル
80φ
40
40φ
10
28
50φ
33φ
25φ
138
50
網張り枠
旋回部
クランプ金具
網張り枠
取付部

図 5　ロードセル取付部の組立て図面

Connecting with a load cell to the body of the experimental apparatus

てシャフトをパイプに固定して一連の操作を完了する。

図6は網張り枠の製作図面を示したものである。枠の内寸は1m×1mであり，枠に使用しているパイプはsus製の17.5m/mφのものである。網張り枠はジョイントを介してシャフトに接続される。

今回試作した網地抵抗測定装置の荷重検出機構には差動トランス方式を予定していたが，予算の都合でこれを採用できなかったので，漁業生産工学部所属の動歪測定装置で代用することにした。その仕様は表1に，その装置の写真は図7に示すとおりである。

今回は，共和電業株式会社製のLu-KA型ロードセル4台を互換的に使用して平面網地に掛かる揚力および抗力を測定することにした。したがってこれら4台のロードセルを適当に組み合わせて使用すれば，ロードセル感応部において最大50kgwの荷重までの精密な測定が可能となる。

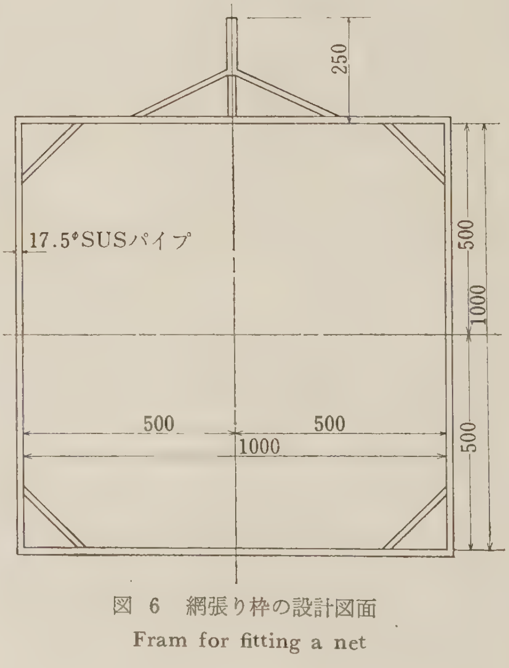

250
17.5φSUSパイプ
500
1000
500
500
500
1000

図 6　網張り枠の設計図面

Fram for fitting a net

表 1　測定装置の仕様概要

Outline of the hydraulic resistance determination system

機器名	型式	仕様	備考
ロードセル	共和電業 Lu-50KA	容量　50kgw	引張り・圧縮両用型
〃	共和電業 Lu-20KA	容量　20kgw	〃
〃	共和電業 Lu-10KA	容量　10kgw	〃
〃	共和電業 Lu-5KA	容量　5 kgw	〃
動歪測定器	共和電業 DPM-220A	測定点　6 点 適用ひずみゲージ　120～1000Ω 感度　0.2V (5kΩ 以上の荷重) 出力　±5V (5kΩ 以上の荷重) 応答周波数範囲　0～2,000Hz	オートバランス方式 ローパスフィルター・ 電源ユニット内蔵
ペン書きオシログラフ（マルチコーダー）	渡辺測器 MC6601	測定点　6 点 紙送り速度　7.5, 15, 30, 60, 75, 150, 300, 600mm/sec ＆ min	
		最大入力電圧　DC500V 測定レンジ　10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000mv/1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200V/250mm の16段切換 最大ペン速度　1,000mm/sec	

3.　貫通式無結節平面網地の流水抵抗測定結果

3.1　実験材料

表 2 に示すように網糸の直径が比較的太い10種類の網地を選び，実験網の d/l 値が0.022～0.136の範囲にほぼ均等に分散するようにした。

実験網の目合（$2l$）と網糸の直径（d）の測定では，網地に掛ける標準初荷重の値は JIS の規定に従ってこれを決めた。目合の測定に当っては，網地の縮結量が 0 の状態で 2 脚と 2 結節の長さをスケールで測定し，5 個の測定値の平均を計算して目合の大きさとした。また網糸の直径は万能投影器（オリンパス光学製Model UP-560S）を用いて測定した。測定に当っては標準初荷重を掛けた網糸を万能投影器のステージ板上に置き，20倍に拡大した網地の像をスクリーン面上に置かれたトレーシングペーパー上に投影して，その像をトレースした。これらの像から 1 資料につき 5 個所の直径をスケールで測かり，その平均値を計算して網糸の直径とした。

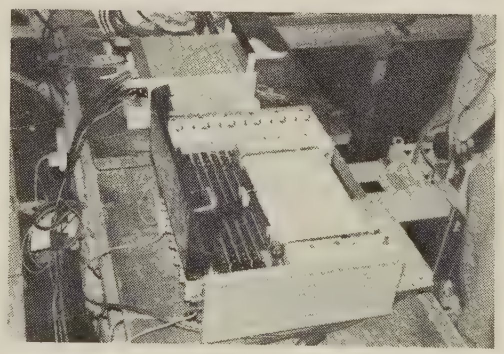


図 7　動歪測定装置

Dynamic strain measuring instrumentation

3.2　実験装置および方法

実験に当っては，水工研所属の曳航水槽（60m×4 m×2 m）の台車上に網地抵抗測定装置本体を設置し，台車を一定速度で曳航して網張り枠の中心に流れを当てた。ロードセルに掛かる荷重から網張り枠の中心に掛かる揚力および抗力を換算するためには換算式(1)，(2)式を用いたが，本実験では $x=1.115\text{m}$，$y=2.082\text{m}$ に設定したので，R_D と R_L の値は次式で換算した，

$$R_D=0.5355\ T_D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$R_L=0.5355\ T_L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

表 2　実験に使用した網地の明細
Summary of sample nets

網地材料	網糸の直径（d） m/m	目合（$2l$） m/m	d/l
ナイロン	2.19	32.1	0.1360
ナイロン	1.77	32.2	0.1099
ナイロン	3.26	76.3	0.0853
ナイロン	3.63	107.0	0.0679
ポリエチレン	2.24	75.8	0.0591
ポリエステル	2.04	76.0	0.0537
ポリエチレン	2.32	103.0	0.0450
ポリエステル	1.95	108.6	0.0359
ポリエチレン	2.28	150.4	0.0303
ポリエチレン	1.99	180.5	0.0220

（註）網地はすべてマルチフィラメントのものを使用した。

実験に際しては網張り枠に網地を縮結量 0.293 の状態で張り付けた。これは網脚の交差角度がちょうど90°となる縮結量である。実験では実験流速を各実験網とも0.4 m/s，0.5m/s，0.6m/sの三水準に，網地の流れに対する迎角は90°，75°，60°，45°，30°，15°の6水準に設定した。なお実験期間中の水槽水温は13.8～14.2℃の範囲にあった。

3.3　平面網地の抗力係数（C_D）と揚力係数（C_L）

平面網地を定常流の中に設置すると，その網地の中心に働く流水抵抗Rは，一般に

$$R=\frac{1}{2}C_R\ \rho SV^n \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

となる[1,2]。式中のC_Rは抵抗係数，ρは水の密度$\left(\frac{\mathrm{kgw \cdot s^2}}{\mathrm{m^4}}\right)$ Sは網地の面積（m^2），Vは流速（m/s）である。流水抵抗Rは低いレイノルズ数の領域ではストークスの抵抗則に従い流速に比例するが，高いレイノルズ数の領域では流速の2乗に比例することが知られている。藤田等は格子状に張った網地の流水抵抗はレイノルズ数が4.5×10^2～7.5×10^2の範囲で流速の指数nが1から2に遷移することを報告している[3]。今回の実験ではレイノルズ数がほぼ上記の数値を上廻っているため，Rは流速の2乗に比例するとした。

いま，網地の抗力をR_D(kgw)，その抗力係数をC_Dとすると

$$R_D=\frac{1}{2}C_D\rho SV^2=\frac{102}{2}C_DSV^2\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

となり，また網地の揚力をR_L(kgw)，その揚力係数をC_Lとすると，

$$R_L=\frac{1}{2}C_L\rho SV^2=\frac{102}{2}C_LSV^2\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

という関係が成立する。

(8)，(9)式を変形して，C_DとC_Lとを求めてみると

$$C_D=\frac{2R_D}{\rho SV^2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

$$C_L=\frac{2R_L}{\rho SV^2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

となる。

今回の実験では各実験網について，前述のように6水準の迎角毎にその実験流速を0.4，0.5，0.6m/s の3水準に設定し，各流速毎にR_DとR_Lとを実測した。そしてこれらのR_DとR_Lの値を(10)，(11)式に代入して，各実験流速毎のC_DとC_Lの値を計算で求めた。

同一迎角のC_DとC_Lの値は実験流速が0.4，0.5，0.6m/sの範囲内ではその値にあまり大きい変動が見られなかったので，これら3個の値の平均をもって，その迎角における平面網地のC_DまたはC_Lの値とした。

3.4　貫通式無結節平面網地の抗力係数の測定結果

平面網地の抗力係数および揚力係数は一般に網地の迎角θ，網地の縮結量H，網地のd/l値および網地のレイノルズ数の関数であると考えられている。今回の実験では網地の迎角を90°，75°，60°，45°，30°，15°の6通りの

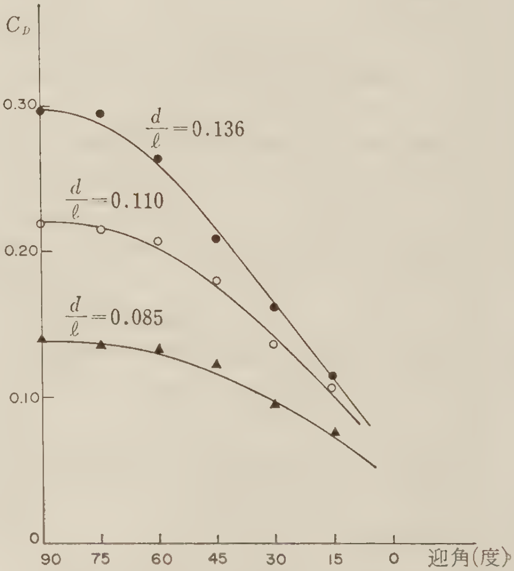


図 8　迎角を変えた場合の抗力係数の値
Relationship between attack angles of experimental nets and drag coefficients

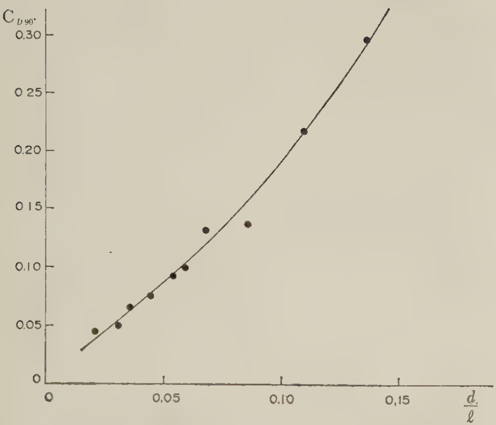


図 9—1 迎角が90°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag coefficients keeping attack angle at 90°

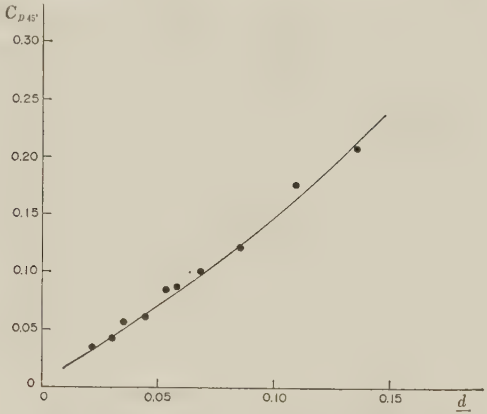


図 9—4 迎角が45°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag coefficients keeping attack angle at 45°

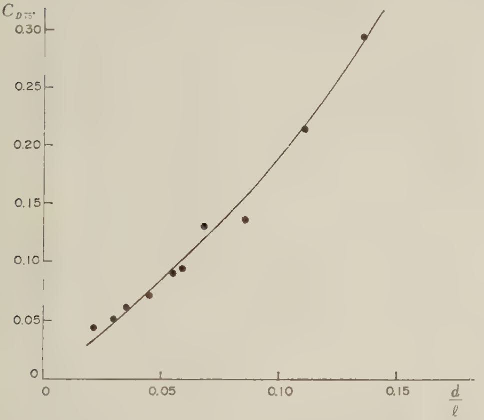


図 9—2 迎角が75°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag coefficients keeping attack angle at 75°

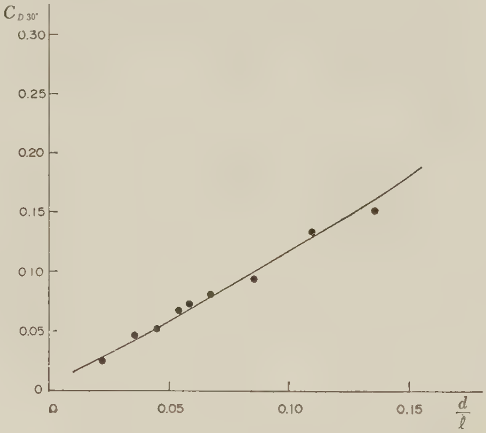


図 9—5 迎角が30°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag coefficients keeping attack angle at 30°

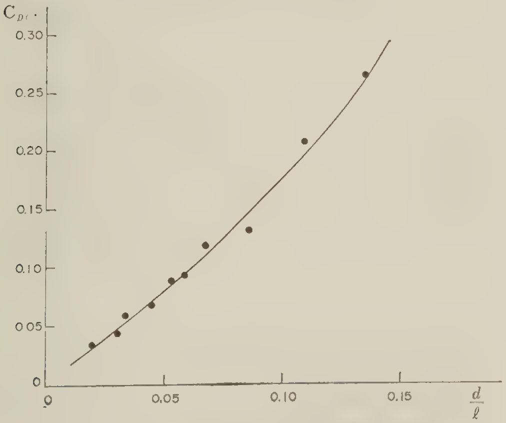


図 9—3 迎角が60°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag cofficients keeping attack angle at 60°

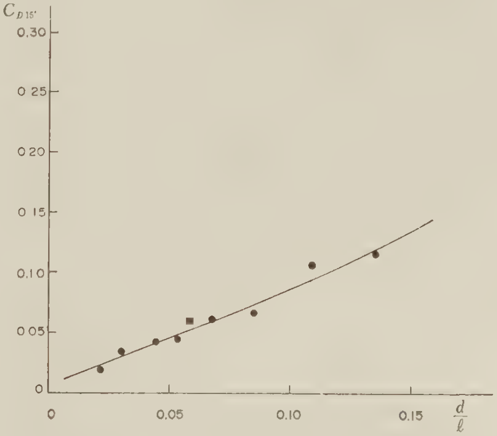


図 9—6 迎角が15°のときの抗力係数の値
Relationship between values of d/l and drag coefficients keepiug attack angle at 15°

場合を想定し，各迎角における網地の d/l 値と抗力係数（$C_{D\theta}$）および揚力係数（$C_{L\theta}$）との関係を解明した。

図8は10種類の実験網のうち，網地の d/l 値が大きいもの3種類について，その迎角と抗力係数との関係を図示したものである。図から明らかなように，各網地とも迎角が90°の時，その抗力係数は最大となり，迎角が75°の時の値は90°の時の値とあまり差異は見られなかった。しかしながら迎角が60°以下になると，迎角が減少するにしたがいその抗力係数の値は次第に逓減して行き，迎角が0°に近ずくに従いこれら三つの抗力係数の値はある一定値に収斂して行く傾向が見られる。この点についてはさらに精密な測定を行ない再度検討する必要があろう。

次に図9－1～図9－6は各迎角毎に，網地の d/l 値と抗力係数（$C_{D\theta}$）の値との関係を示したものである。もし，網地の迎角と d/l 値とが与えられれば，これらの図から平面網地の抗力係数を推定するとこができる。その値を(8)式に代入すれば，貫通式無結節平面網地の抗力の値を計算することができる。

3.5 貫通式無結節平面網地の揚力係数の測定

図10は10種類の実験網のうち，網地の d/l 値が大きいもの3種類について，その迎角と揚力係数との関係を図示したものである。図から明らかなように，各網地とも迎角が45°の付近で，その揚力係数の値は最大となる。

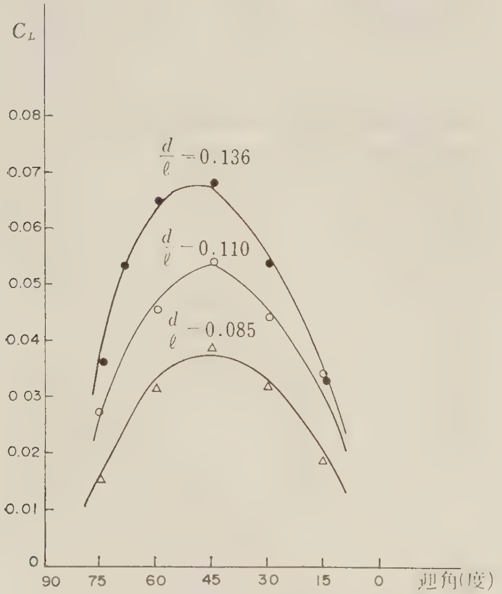


図 10　迎角を変えた場合の協力係数の値
Relationship between attack angles of the exprimental nets and lift coefficients

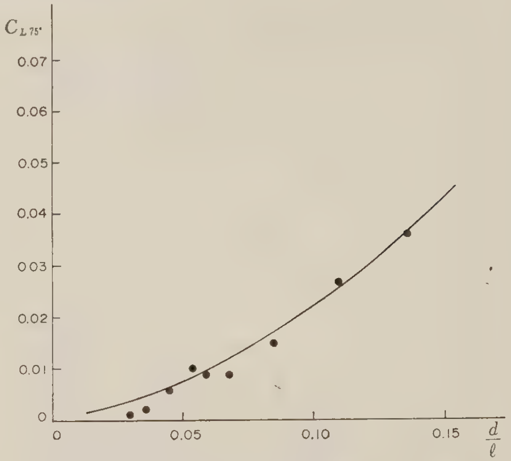


図 11—1　迎角は75°のときの揚力係数の値
Relationship between values of d/l and lift coefficients keeping attack angle at 75°

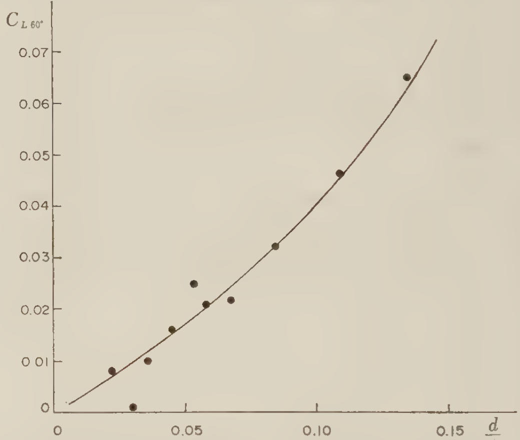


図 11—2　迎角が60°のときの揚力係数の値
Relationship between values of d/l and lift coefficients keeping attack angle at 60°

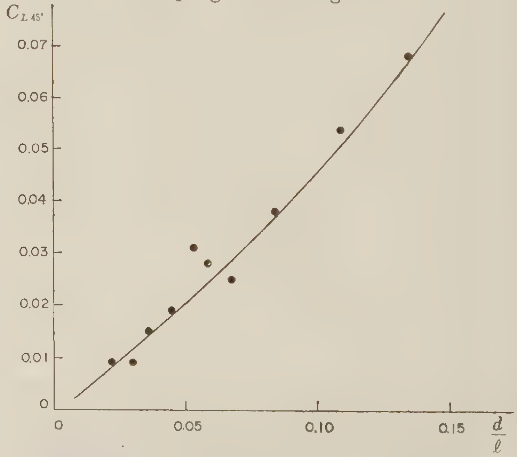


図 11—3　迎角が45°のときの揚力係数の値
Relationship between values of d/l and lift coefficients keeping attack angle at 45°

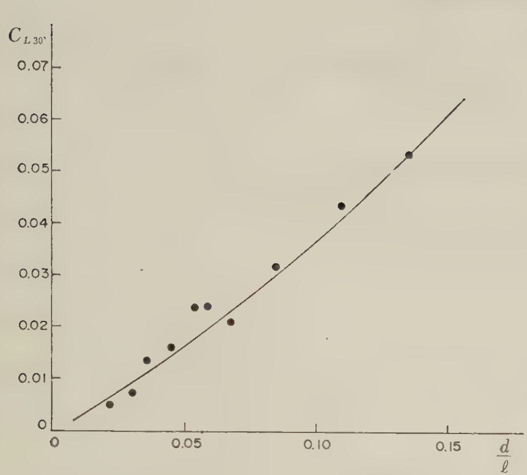


図 11—4　迎角が30°のときの揚力係数の値
Relationship between values of *d*/*l* and lift coefficients keeping attack angle at 30°

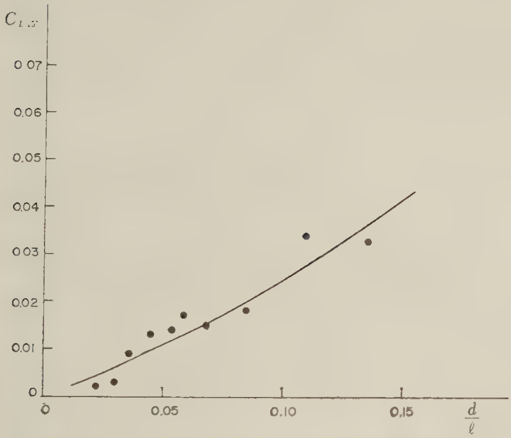


図 11—5　迎角が15°のときの揚力係数の値
Relationship between values of *d*/*l* and lift coefficients keeping attack angle at 15°

次に図11－1～図11－5は各迎角毎に，網地の *d*/*l* 値と揚力係数（$C_{L\theta}$）の値との関係を示したものである。もし，網地の迎角と *d*/*l* 値とが与えられれば，これらの図から平面網地の揚力係数を推定することができる。その値を(9)式に代入すれば，貫通式無結節平面網地の揚力の値を計算することができる。

4.　結　語

今回新たに試作した網地抵抗測定装置を使用して，貫通式無結節平面網地の抗力係数と揚力係数を実測し，図9－1～図9－6（抗力係数）および図11－1～図11－5（揚力係数）に示すような結果を得た。したがって，これらの図から得られる抗力係数および揚力係数の値を(8)，(9)式に代入すれば貫通式無結節平面網地（縮結量0.293）の抗力および揚力の値を計算で推定することが可能となる。

今後は実験網の材質を統一して，再度，蛙又結節平面網地，貫通式無結節平面網地およびラッセル平面網地の抗力係数と揚力係数とを実測するとともに，これらの網地における縮結量の違いが抗力係数と揚力係数との値に及ぼす影響についてもあわせて検討して行きたい。

参　考　文　献

1）田内森三郎：水産物理学，朝倉書店，1955，p. 50～64
2）今井健彦：平面網地の流水抵抗に関する基礎的研究—Ⅳ，日水誌，45（10），1979
3）藤田博・横田敏之：網地の水中に於ける抵抗に就て—Ⅰ，応用物理，20（2），1950

Studies on Resistance of Plain Net against Flow of water I

On the Experimental Apparatus for Measurement of Hydraulic Restance of Plain Net and Result of the Experiment Determined by the Apparatus

By

Yoichi OSAWA, Keishiro MORI and Yozo TAWARA

Summary

The authers devised and made an experimental apparatus to measure the hydraulic resistance of plain nets. Using this apparatus, we carried out the measurement on drag force and lift force of knotless nets against flow of water.

In the experiment, each sample net which was fitted to a fram was hunged in 0.293 and the attack angle of the sample nets was 90°, 75°, 60°, 45°, 30° and 15° respectively.

The drag coefficient and the lift coeffcient were calculated using the data obtained from the experiment.

These value were shown in Figs. 9 and 11. Giving these coefficients, we can get drag force and lift force of every plain knotless net hunged in 0.293 by the following formulae.

$$R_D=\frac{1}{2}C_D\rho SV^2$$

$$R_L=\frac{1}{2}C_L\rho SV^2$$

Where R_D : Drag force of the plain knotless net (Kgw)
R_L : Lift force of the plain knotless net (Kgw)
C_D : Drag coefficient
C_L : Lift coefficient
ρ : Density of water (102 Kgw sec^2/m^4)
S : Area of a plain knotless net (m^2)
V : Current speed (m/sec)

水工研報告 3
1982 pp. 239～292

カニ刺網の構造と漁獲性能に関する研究

笹川 康雄*

目次

1. 序 論…… 239
  1.1 カニ刺網漁業の変遷 …… 239
  1.2 本研究の目的 …… 239
2. 漁具構造と漁獲性能…… 240
  2.1 実験方法 …… 240
  2.2 実験結果 …… 243
  2.3 考 察
    タラバガニの大きさに対する選択性…… 246
3. 予備浮力，網目の展開および脚張力の分布…… 252
  3.1 実験方法 …… 253
  3.2 結果と考察 …… 255
4. 総 括…… 268
  4.1 脚数と漁獲能力との関係 …… 268
  4.2 予備浮力と漁獲能力との関係 …… 275
  4.3 網糸の太さと漁獲能力との関係 …… 278
5. 結 論…… 279
  謝 辞…… 279
  文 献…… 280
  Summary …… 282
  付 表…… 288

1. 序 論

1.1 カニ刺網漁業の変遷

我が国では，はじめ北海道沿岸の浅所まで来遊するタラバガニ Paralithodes camtschatica (Tilesius) を磯舟で捕獲していたが，やがて根室海水域で無動力船によるカレイ手繰網やタラ延縄でタラバガニを漁獲するようになった。次いで稚内水域でも明治40年（1907）頃から延縄や手繰網を用いるようになり，ちょうどその頃，カニ缶詰工場の増加にともない従来の小規模な操業ではタラバガニに対する需要を満たすことができなくなり，根室海水域で和泉勝平氏が1尺8寸目の底刺網を試作し操業した結果，従来の3倍以上の漁獲を得た。このため，カニ刺網の着業数は増加し漁場の競合を生じ，手繰網の操業に支障を与えるなどの理由からカニ刺網の操業が一時中止されたが，大正元年（1912）頃から許可されて普及した。

稚内水域においては1916年頃，延縄から一時漁具構成がカニ刺網に類似したカスベ網に転換した後に，綿糸5号，1尺5寸目の網地を浮子方37間，沈子方29間に仕立たカニ刺網を使用するようになった1-3)。

その後，カニ刺網漁業は大正2年（1913）頃に始まった漁船の動力化をはじめ，漁撈設備の機械化など漁業規模を拡大し，漁場は北海道からカムチャカ水域にまで北進し，とくに工船式操業に成功してからはアラスカおよびナワリンからオリュートルに亘る広汎な北洋全域に漁場を拡大した。1927～1930年の最盛期におけるカニ缶詰の年産函数は50万函にも達した1-6)。このようにカニ缶詰に対する欧米諸国からの強い需要に支えられて飛躍的発展を遂げた日本の工船式カニ漁業は第二次世界大戦によって一時中断したが，1953年に操業が再開されてからは漁獲量が再び急増していった。しかし，1958年以降は厳しい国際関係の下で規制が強化され我が国の年漁獲許容尾数は年々削減され，1969年にベーリング海西部水域のアブラガニ Paralithodes playpus Brandt の漁場で，1957年にカムチャッカ西方水域およびベーリング海東部水域の両タラバガニ漁場で，夫々操業が禁止され，日本人が開拓し永年の辛苦努力の末に到達した伝統的な北洋タラバガニ漁業は消滅した6-8)。

1.2 本研究の目的

漁業変遷の中で漁船の動力化，カニ工船の出現，漁撈設備の機械化，省力化など漁撈技術上幾多の改革があったが，カニ刺網については1955年以降に綿糸網から合成繊維網に変り，網の材質が改良された点を除くと，その

---

* 元漁業生産工学部（現北海道開発局土木験試所第1部水産土木研究室）

注）この論文は，筆者の学位請求論文である。その論文に対し，昭和55年12月25日北海道大学から水産学博士の学位が授与された。

性能に幾つかの欠かんを含みながら半世紀以上にも亘ってさしたたる変化がみられなかった。カニ刺網に関する研究には第二次世界大戦前に丸川9) による目合あるいは縮結が異なるカニ刺網の漁獲性能比較試験，および加藤10)によるカニ刺網の網成りとタラバガニの生態の潜水観察がある。丸川は〝網目及び縮結の大小に依り捕獲さるる蟹の平均甲幅には大なる影響なしと雖も，網目の大なるものは小形蟹の罹網尾数少く，従って捕獲さるる尾数少し而して縮結大なれば小形蟹の罹網尾数多くして漁獲尾数多し11)と述べている。しかし，表1を見る限りでは，目合あるいは縮結が異なるカニ刺網間の漁獲性能には上述のような差異を認め難い。加藤の観察記録は後述するようにカニ刺網の網成りとタラバガニの生態の実体を認識させる。

表 1　刺網による蟹漁獲試験成績

Table 1. Experimental result of crab fishing with gill nets*

Size of mesh and shortening		45.5cm 60%	54.5cm 60%	60.6cm 60%	45.5cm 30%	54.5cm 30%	60.6cm 30%
Number of crabs caught		97	81	90	93	81	52
Width of Carapace	Max.	207mm	210mm	213mm	197mm	205mm	204mm
	Min.	59	88	89	86	91	95
	Average	148	145	145	146	144.7	139.2

*By Marukawa (1933)9)

第2次世界大戦後，日ソ漁業委員会の取決めに基づき，北洋タラバガニ資源調査が開始された。著者は西カムチャッカ陸棚水域において水産庁調査船で漁具構成が異なる10種類のカニ刺網により，標識放流標本など資源生物学的資料の集収を兼ねて，カニ刺網の漁獲性能実験を立案実施した。その主目的は，カニ刺網の漁獲能力の向上および漁獲経費の軽減の他に次に列記する視点に基づいたものであった。

(i)　雌がにおよび仔がにの莫大な混獲死亡を軽減するなど，タラバガニ資源の生産性を最も有効に利用しうるカニ刺網の開発。

(ii)　日本のカニ刺網がソ連のそれに倍する漁獲性能を有する要因の究明。

(iii)　タラバガニ資源研究における資料の主要な採集具となっているカニ刺網の漁獲性能の解析。

第2次世界大戦後のカニ刺網に関する研究では笹川11)が目合の縮小あるいは縮結の増加により漁獲能力は著しく高まるが，選択性は変らないことを確認し，葉室12)は網高さ計測値から適正な浮力と沈降力およびそれらの配分を論じ，谷野，笹川13)は日ソ間の漁獲能力比が2：1であることを報告している。これら3編の研究報告の他に大手の漁網メーカーあるいは水産会社の調査報告があるが，それらは非公表である場合が多いし，網地あるいは棚の材質を異にした網による漁獲試験結果以外には，非公表報告としても接していない。

本研究では先きに著者が立案，実施した調査・研究で得られた漁具構造と漁獲性能との関係を明確化し，その機構を解析し，要因を究明しようとしたもので，漁獲機構の解析上重要とされている浮子の浮力がカニ刺網の各部に如何に配分されているかという課題とそれに関連した物理的側面を明らかにし，さらにカニ刺網の物理的側面だけでなくタラバガニの生物学的側面からも考察をすすめ，認識を深めることに努めた。

2.　漁具構造と漁獲性能

カニ刺網の漁獲量は主にカニ刺網の漁獲能力，網地面積と留網時間およびタラバガニの存在密度と平均移動速度の5つの条件により決まる。本章では研究対象をカニ刺網の漁獲能力に限定し，それと漁具構造との関係を実験により把握し，その成因を解析して要素を明確化した。

カニ刺網の構造と漁獲性能との関係については過去に数編の研究報告がある9-13)。本研究における実験方法には過去のそれらと若干の相異点がある。それは漁具構造が1箇所だけ異なるカニ刺網の連結を1反毎に繰返す設網法によって漁獲比較を行った点で，同種の網を一まとめにした設網法で比較試験を行なっている試験結果にくらべて，実験回数に大差が無い場合，両者の信頼度に大きな差異が生じるであろう。何故ならば，カニ刺網あるいは板曳網の多数の漁獲資料から操業位置の相異による漁獲物の著しい変動いわゆるむら獲りのある場合の多いことが判っているからである。従って，カニ刺網の目合あるいは縮結の相異による漁獲性能の変化が，丸川9) の実験（表1）では不明確であるが，著者11)の実験結果（表5および6）ではそれが著しいという両者の相異も設網法の違いに起因するものと思われる。

2.1　実験方法

2.1.1　時期，場所および実験回数

政府調査船北鳳丸（85トン）により1958年および1968年の春夏季，カムチャッカ西岸沖のタラバガニ漁場の9地点で実施した。表2に示すように，試験網の留網日数は1〜8日，研究に用いた延反数は690.5反である。同表中の AB……K は表3に示されている試験網の記号で

表 2　構造の異なる網による漁獲試験回数

Table 2. Number of fishing experiments with the nets differed in their structure

No. of	Position		Date		Amount of net observed (Tan)											
fishing	Lat. N	Long. E	Net set	Net haul	A	B	C	D	E	A	F	G	H	K	A	Total
1	57°10′	156°10′	Jun. 14, 1958	Jun. 16, 1958	20	13	8	20								61
2	55°55′	155°18′	Aug. 1, 1958	Aug. 3, 1958	13	10	11	6								40
3	57°08′	155°52′	Aug. 6, 1958	Aug. 6, 1958	10	8	9	6								33
4	52°42′	155°80′	May 2, 1963	May 3-7, 1963					20	19	19			20		78
5	57°27′	156°28′	May 29. 1963	May 31-Jun.1. 1963					20	16	19			19		74
6	56°25′	155°18′	Jun. 7, 1963	Jun. 8-16, 1963					8	8	8	19	20	8	20	91
7	56°31′	155°21′	Jun. 17, 1963	Jul. 18-21, 1963					16	16	16	8	8	16	8	88
8	56°36′	155°14′	Jul. 24, 1963	Jul.25-Aug.2, 1963					6	6	6.5	24	24	7	24	97.5
9	52°30′	156°33′	Jul. 29, 1963	Jul. 30, 1963					8	7	8			7		30
					43	31	28	32	78	72	76.5	51	52	77	52	592.5

* Length of a tan is about 43-47m.

あり，A網とA′網とは同じ構造の試験網であるが，A網がB，C，D網あるいはE，F，K網と連結されているのに対し，A′網はGおよびH網と連結されている。

1反は網付長が浮子方で4728cm，沈子方で4260cmおよび網丈けが321cmが普通であるが，試験網の場合は表14に示すように網付長が浮子方で4716～4728cmおよび網丈けが250～362cmである。

2.1.2　使用漁具

縮結，目合，浮子結付数および網糸の太さの中，1条件だけ漁具構造が異なる10種類のカニ刺網および魚捕部の目合を3.0cmにした板曳網を用いた。カニ刺網の種類は目合が30.3cmから75.8cmまでの範囲で相異する4種，縮結が0.303から0.800までの範囲で相異する3種，浮子（浮力175g，直径8.5cmのガラス玉）の反当結付数を6個から18個までの範囲で相異させた3種および網糸の直径が0.119cmと0.181cmとに異なる2種である（表3および4）。

3.1.3　設網法

1反毎に異なった種類のカニ刺網の連結を繰返した。設網線の方向は南北で，ほぼ等深線に沿っている。

2.1.4　曳網法

試験網の設網線の両端に隣接する延長線上で，板曳網を約1浬曳網した。

2.1.5　漁獲量および漁獲物の計測法

雄大型ガニ（甲幅13cm以上），雄小型ガニおよび雌ガニの罹網数を揚網機直前で1反毎にカウントした。漁獲物は試験網の種類別に甲板上に集積し，原則としてその全数あるいは無作意に抽出した標本について甲幅，甲長

表 3　試験網の構造変化

Table 3. Structural variation of experimental nets

Experimental net		Netting twine	Mesh size in stretch	Number of mesh		Shrinkage		Number of float
Mark	Name			in depth	in length	Float side	Sinker side	
A	Commercial net	Vinylon 20′s 7/X3/Z	500mm	7	240	60.6%	64.5%	12
B	1 shaku mesh net	〃	303	13	396	60.6	64.5	12
C	2 shaku mesh net	〃	606	6	198	60.6	64.5	12
D	2.5 shaku mesh net	〃	755.5	5	158	60.6	64.5	12
E	30% shrink. net	〃	500	7	135	30.3	36.9	12
F	80% shrink. net	〃	500	7	472	80.0	81.9	12
G	6 floate net	〃	500	7	240	60.6	64.5	6
H	18 floats net	〃	500	7	240	60.6	64.5	18
K	Thick twine net	Cotton 10′s 3/X8/S	500	7	240	60.6	64.5	12

Note The other structure are same as A net in Table 4.

表 4　商業網（A網）1反の仕様

Table 4. Structures of a commercial net (A net) by the tan

Part names	Structure
Netting	Vinylon 20′s 7/×3/Z treated with resin. English knot. Mesh size, 500 mm. 7 meshes deep. 240 meshes in length.
Float line	Manila twine 3/2, 5.0 g/m. Length with netting, 47.3 m. Total length, 48.4 m.
Sinker line	Manila iwaito 2×3/Z, 44.5 g/m. Length with netting, 42.6 m. Total length, 44.1 m.
Poach line	Vinylon 20′s 11/×3/Z twin is pierced every top meshes of netting, and is fastened to float line and every third mesh at intervals of 59 cm in float side. vinylon 20′s 12/×3/Z twine is pierced every meshes of the lowest part of netting, and is fastened to sinker line and every fourth mesh at intervals of 71 cm in sinker side.
Float	12 glass balls, 85 mm in diameter and 175 g in buoyancy are tied to the float line
Sinker	10 semisphere cement weighing 500 g in water is tied to the sinker line.

表 5　縮結別反当罹網尾数，漁獲比および漁獲物組成

Table 5. Number of catch per tan, catch ratio and catch composition in shrinkages

Exp. net (shrinkage)	Catch per tan				Catch ratio				Catch composition		
	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
E net(30.0%)	3.6	2.4	1.9	7.8	35	32	51	37	46	30	24
A net(60.6%)	10.2	7.4	3.7	21.3	100	100	100	100	48	35	17
F net(80.0%)	18.3	11.1	4.9	34.4	179	150	132	162	100	32	14

Note; Large male≧130 mm in carapace width>small male.

および体重を測定するとともに漁獲尾数を確認した。甲幅組成は反当罹網尾数によって修正して作成した。

2.2　実験結果

2.2.1　縮結別漁獲試験

内割（浮子方）が0.303，0.606および0.800からなる3種類の試験網による漁獲試験の結果は

1)　反当罹網尾数nは縮結Sの増加に伴い指数曲線的に増加する。最小自乗法で求められたlog nのSに対する回帰直線から次の指数式が求められた（表5図1および2）。

$$\log n = 0.512 + 0.0130\,S$$

$$n = 3.25\,e^{0.0299S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

2)　留網時間の増加に伴う反当罹網尾数の増加は縮結の多い試験網ほど著しい（図3）。

3)　縮結が異なる試験網の漁獲物組成および甲幅組成には差がない（表5，図4および付表1）。

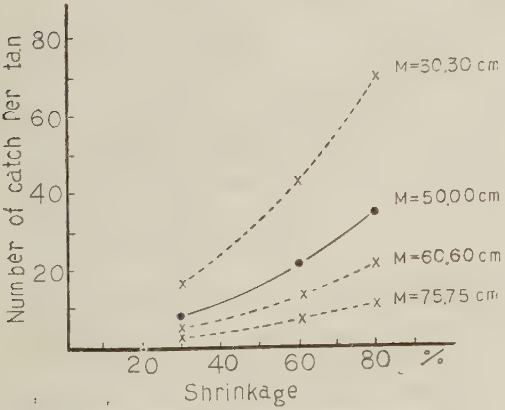


図 1　縮結による反当罹網尾数の変化

Fig. 1. Variation of catch per tan with shrinkage

• : Actual plot.

× : plot calculated using the catch ratio in Table 6

2.2.2　目合別漁獲試験

目合が30.3cm，50.0cm，60.6cmおよび75.8cmの4種からなる試験網による漁獲試験の結果は

1)　反当罹網尾数は目合Mの縮小に伴い著しく増加する。Mとlog nとは直線関係にあり，次の指数式で表れる（表6および5図）。

$$\log n = 2.0060 - 0.0180M$$

$$n = 101\,e^{-0.0415M} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

2)　漁獲物組成には差が認められない（表6および付表1）。

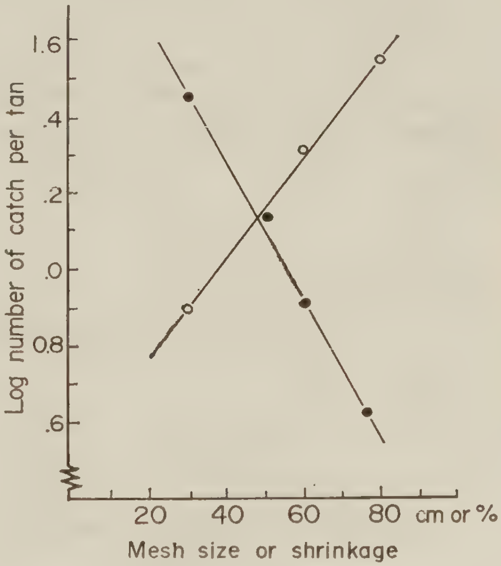


図 2　目合（縮結60.6%）あるいは縮結（目合50 cm）に対する反当罹網尾数（対数）の回帰

Fig. 2. Regression of the logarithms of number of catch per tan plotted against various shrinkages in 50 cm mesh size (∘) or against various mesh sizes in 60.6% shrinkage(•)

表 6　目合別反当罹網尾数，漁獲比および漁獲物組成

Table 6. Number of catch per tan, catch ratio and catch composition in mesh sizes

Exp. net (mesh size)	Catch per tan				Catch ratio				Catch composition		
	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
B net(303mm)	15.1	9.6	3.0	27.6	188	246	176	203	55	35	11
A net(500mm)	8.0	3.9	1.7	13.6	100	100	100	100	59	29	13
C net(666mm)	3.5	3.0	1.6	8.2	44	77	94	60	43	37	20
D net(758mm)	2.1	1.3	0.9	4.2	26	33	53	31	49	30	22

2.2.3　浮子数別漁獲試験

8.5cm径ガラス玉の反当結付数が6個．12個および18個からなる試験網による漁獲試験の結果は

1）反当罹網尾数は浮子結付数が6個および18個の試験網より浮子結付数12個の試験網が平均20％多い（表7）。

2）留網時間と反当罹網尾数との関係をみると，漁獲尾数は，罹網尾数の少ない（反当罹網尾数1～30尾）第6調査点では浮子結付数の多い（反当結付数18個）網が最も少ないのに反し，罹網尾数の多い（反当罹網尾数40～73尾）第8調査点では浮子結付数の多い網がそれの少ない（反当結付数6個）網を上廻る傾向がある（図6および付表1）。

3）漁獲物組成に対するT検定および甲幅組成に対するχ^2検定によれば，浮子結付数を異にする試験網の間の漁獲物組成および甲幅組成の差は有意ではない（表7，付表1および図7）。

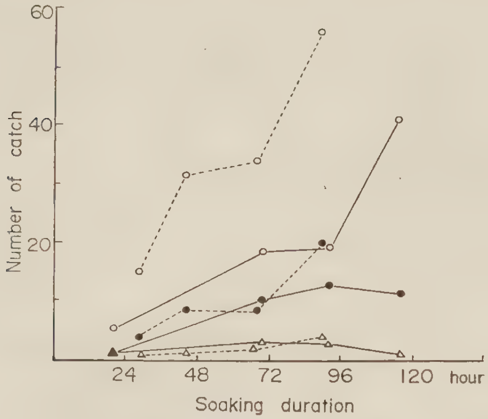


図 3　留網期間による縮結別漁獲量の変化

Fig. 3. Increase of catch of the nets with various shrinkages by soaking duration

△：30.0％ in shrinkage.　——：1st station

•：60.6％ in shrinkage.　……：2nd station.

○：80.0％ in shrinkage.

2.2.4　網糸別漁獲試験

身網が綿糸 10's 3/24とビニロン（クレモナ）20's 3/21

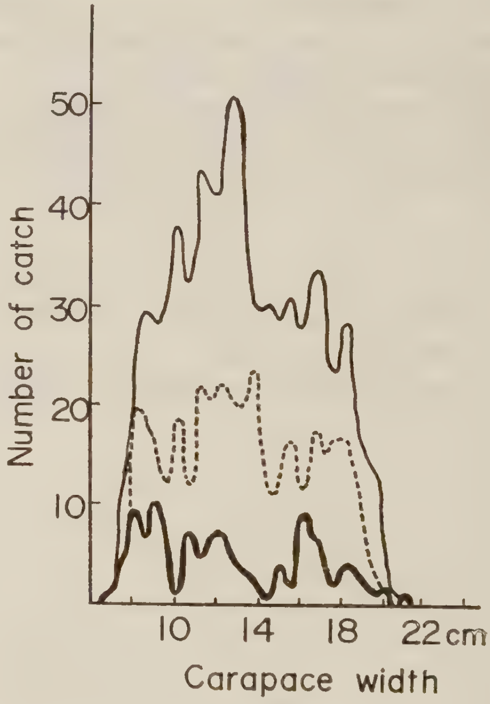


図 4　縮結別甲幅組成

Fig. 4. Size distribution of king crab caught with various shrinking nets.

Bold line: 30.0％ in shrinkage, and 12.6cm in the average carapace width.

Broken line: 60.6％ in shrinkage, and 13.5cm in the average carapace width.

Thin line: 80.0％ in shrinkage, and 13.5cm in the average carapace width

表 7 浮子数別反当罹網尾数，漁獲比および漁獲物組成

Table 7. Number of catch per tan, catch ratio and catch composition in numbers of float attached per tan

Exp. net	Catch per tan				Catch ratio				Catch composition		
(No. of float)	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
G net(18)	10.1	16.7	4.9	31.8	81	76	75	78	32	53	16
*A′*net(12)	12.5	22.1	6.5	41.0	100	100	100	100	30	54	16
H net(6)	10.5	18.5	4.8	33.9	84	84	74	83	31	55	14

の網糸で夫々構成されている試験網による漁獲試験の結果は

1) 反当罹網尾数はビニロン20′s 3/21の網が綿糸 10s 3/24の網の2倍である。*T* 検定によれば，両網の平均値の差は雄大型ガニ，雄小型ガニおよび雌ガニの夫々が5%．1%および2.5%の有意水準で有意である（表8および付表1）。

2) 漁獲物組成はビニロン20′s 3/21の網より綿糸10s 3/24の網は平均で雄大型ガニが17%多く．雄小型ガニが13%．雌ガニが4%夫々少ない。T検定によれば，雄大型ガニおよび雄小型ガニは夫々1%の有意水準で差が認められるが．雌ガニは10%の有意水準でも差が認められない（表8および付表1）。

3) 甲幅組成によれば，綿糸10′s 3/24の網はビニロン20′s 3/21の網より甲幅14.5cm以下の漁獲尾数が少ないため．平均甲幅が0.8cm大きくなっている（図9）。χ^2 検定によれば，$\chi^2=35.03<\chi^2$ (26,0.05) で，両網の甲幅組成には有意差が認められない。

2.2.5 板曳網曳網試験

目合別漁獲試験を除く，各種試験網による漁獲試験中，試験網の設網線の両端に隣接する延長線上で板曳網を2.4ノットで約1浬だけ曳網した。1浬曳網当り漁獲尾数および漁獲物組成を表9に示す。表中，第6～8漁獲調査点では浮子結付数別漁獲試験が行なわれており，第4～8漁獲調査点では縮結別および網糸別漁獲試験が行なわれている。

図10は第6～8漁獲調査点において板曳網が漁獲したタラバガニの甲幅組成を示し，図11は第4～8漁獲調査点におけるそれを示す。

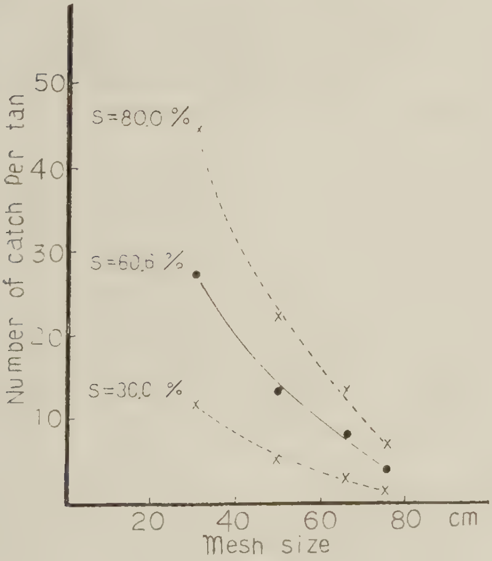


図 5 目合による反当罹網尾数の変化

Fig. 5. Variation of catch per tan with mesh size

- • : Actual plot
- × : Plot calculated using the catch ratio in Table 5.

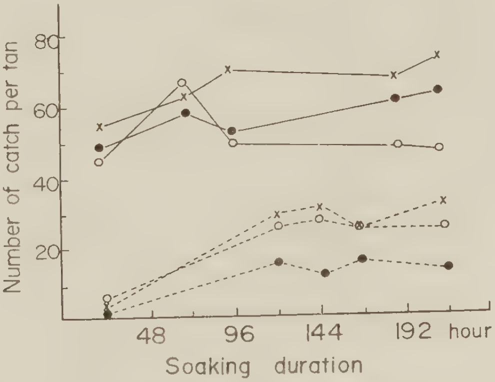


図 6 留網期間による浮子数別漁獲量の変化

Fig. 6. Variation of catch during soaking by the nets with various numbers of float

○ : 6 floats. × : 12 floats.
• : 18 floats. —— : 8th station.
…… : 6th station.

表 8　網糸別反当罹網尾数，漁獲比および漁獲物組成

Table 8. Number of catch per tan, catch ratio and catch composition in net cords

Exp. net (net cord)	Catch per tan				Catch ratio				Catch composition		
	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
A net(vinylon 20′s 7/X3/Z)	10.2	7.4	3.7	21.3	100	100	100	100	48	35	17
K net(cotton 10′s 8/X3/S)	7.4	2.5	1.5	11.4	73	34	41	54	65	22	13

9表および付表2に示されている板曳網の漁獲物組成を夫々対応している各種試験網の漁獲物組成と対比すると，身網が綿糸 10′s 3/24の試験網だけが板曳網に比し19%雄大型ガニが多く，雄小型ガニが少ない。T検定の結果も夫々5%と1%の有意水準で差が認められる。他の試験網の漁獲物組成と板曳網のそれと間のにおける小差は有意ではない。

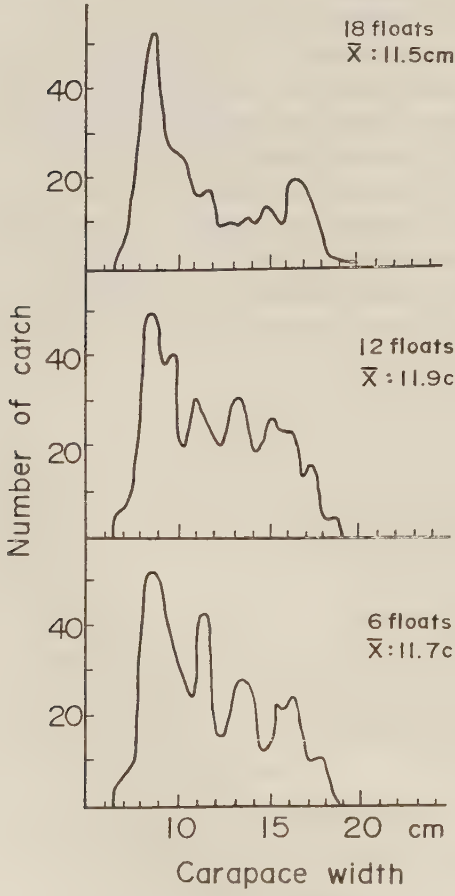


図 7　浮子数別甲幅組成

Fig. 7. Size distribution of king crabs by the nets with various numbers of float

2.3 考　察

タラバガニの大きさに対する選択性

日本で刺網と呼称されている漁具の漁獲性能には網目に魚体を刺して獲る場合と網地に魚体を絡ませて獲る場合とがある。

前者は主に鰓蓋主骨後縁の頭周および最大胴周で決められる魚の大きさと網目周との関係で選択範囲が決まるとされていて，Farran[14]を始め多くの研究者が漁獲物の大きさに対する鋭どい選択性を認めている。カニ刺網はタラバガニの体殻に網地を絡ませて捕獲するもので，明らかに後者に属す。カニ刺網のタラバガニの大きさに対する選択性の問題は，タラバガニの網目通過率および網地へのてん絡率がタラバガニの大きさによって相異するか否か，あるいは如何に相異するかに帰着すると考えることができる。従って，以下ではカニ刺網によるタラバガニの大きさに対する選択性について，網目による作用と網地による作用とに分けて考察をすすめる。

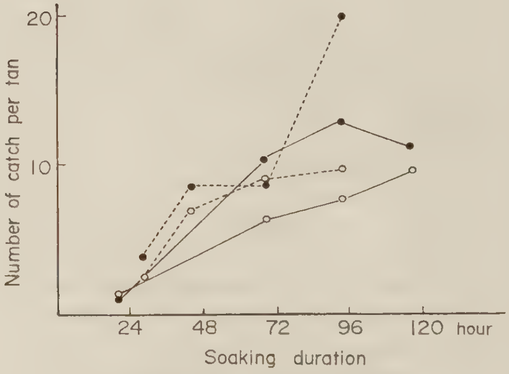


図 8　留網期間による網糸別漁獲量の変化

Fig. 8. Variation of catch during soaking by the nets with vinylon 20′s 7/×3/Z twine (•) or cotton 10′s 8/×3/S twine (○) ……: 1st station.　——: 2nd station.

表 9　板曳網 1 浬曳網当り漁獲尾数および漁獲物組成

Table 9. Number of catch a mile trawling and catch composition of Itabiki ami (a kind of trawl net)

No of fishing	Number of catch				Catch composition		
	Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
6—8	19.6	27.4	7.3	54.3	36	50	14
4—8	17.5	15.8	4.6	37.9	46	41	13

2.3.1 網目による選択性

加藤[10]は潜水観察によって〝普通の状態において網目（目合50.0cm，縮結0.606）が展開する幅は約7〜8寸（21.2〜24.2cm）であり，小ガニではあったが此の網目を通過する″と述べている。

本研究結果によれば，目合が50.0cm の場合．縮結が0.303から0.800まで増加しても，また縮結が0.606の場合，目合が30.3cmから75.8cmまで大きくなっても漁獲物組成あるいは甲幅組成に有意差があらわれない。すなわち，タラバガニの大きさあるいは性に対する網目による選択性が変らない。

この研究結果を解析するには，タラバガニについては外形，歩行体型および対網生態をカニ刺網について網目の幅と長さを明らかにして網目通過の可能性を検討せねばならない。

カニの歩行は鋏脚を除く脚を用い，前後左右への運動が可能であるが，進行方向の脚は地上に固くさし入れて体を引っぱり，反対方向の脚は体を支える[15,16]。各肢節の運動方向および自由性は関節膜の広がり，関節を構成する外骨格の溝と隆起などの形状によって決まり，いくつかの関節軸面がい互に異なることによって肢の運動の自由が保証される[15]。カニ型異尾類であるタラバガニの歩脚の関節軸面の相異は前節と腕節とで90度近くに達している。タラバガニ漁場における水中テレビ観察[16]およびカニ工船（約1万トン）上の大型水槽（1.5×3.0×1.0m）で観察したタラバガニの平常の移動は前進ない

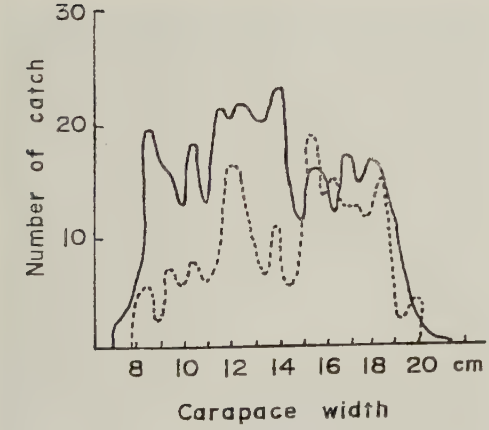


図 9　網糸別甲幅組成

Fig. 9. Size distribution of king crabs by the nets with vinylon 20′S 7/×3/Z netting (solid line) and cotton 10′S 8/×3/S netting (broken line)

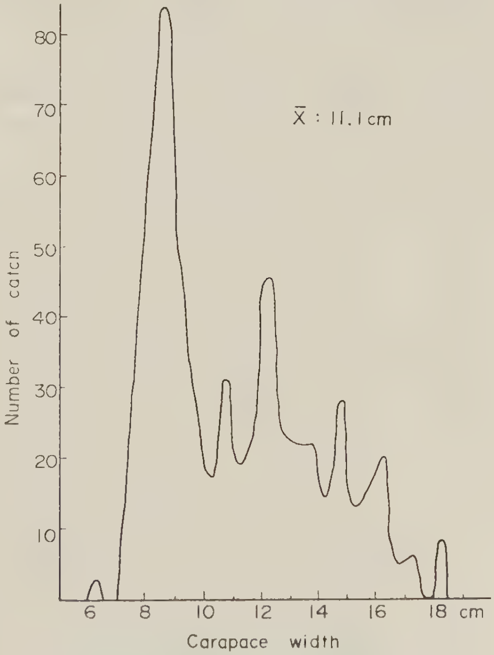


図 10　浮子数別漁獲試験時における板曳網の甲幅組成

Fig. 10. Size distribution of king crabs caught with Itabiki ami (a kind of trawl net) at 6th -8th stations where the nets witht various numbers of float were examined

し側進である。潜水観察した加藤10)は〝タラバガニの歩行方向は左右の横歩きを最も得意とし，前にも進み，歩行の際は多く潮流を背に受けて歩くようで，網に向って正面または斜めの方向より横歩きで静かに進んで来る〟と述べている。一方，水中テレビで観察した武富18)は〝タラバガニはほとんど潮流と同方向へ移動し，一部は斜めに潮流に沿って歩行，移動していた。歩行速度は汐流速度とほぼ等しいか，それよりわずかに遅い程度であった。テレビ画面よりの測定で最高0.4 m/sec，最低0.06 m/secと測定された。また，後進やいわゆるカニの横這い動作は見られなかった。しかし，障害物に会うと完全な横這いではないが横移動する。歩行中は腹部が約10〜15cm 程度離底し，爪先は海底に着底しているが軽く爪先立っている感じである〟と述べている。武富の観察は加藤10)のそれと重要な相違があるが，著者らがその3年前に水中テレビで観察したタラバガニの生態18)は武富の報告により近似している。すなわち，タラバガニの歩行体勢は歩脚の長節を側方ないしはそれより少し上方へ，長節より先の3節は下方ないしは少し外側へ斜め下方に向け，爪先立った姿勢である。その移動方向は明らかに真正カニ類のいわゆる〝カニの横這い〟ではなく，ヤドカリ類の前進ともやや異なる斜め前進であった。テレビモニターに次々と現われる大型雄がには一様に強い潮汐流と同方行へ移動しており，群の大移動の感がした（図版1）。

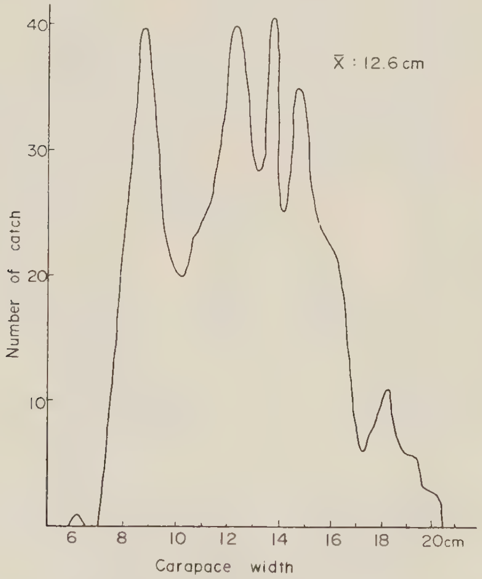


図 11　縮結別および網糸別漁獲試験時における板曳網の甲幅組成

Fig. 11. Size distribution of king crabs caught with ltabiki ami at 4th–8th stations when the nets with various shrinkages or net cords were examined

タラバガニの水中体重が空中体重の10％位であること19)，その流水抵抗が大きいことおよび潮汐流が卓越し，海底の大部分が砂泥である西カムチャッカタラバガニ漁場20−25)を爪先立って歩行する際の移動は潮汐流による漂流と走性にもとづく推進との合成であろう。従って，その歩行は流速が大きくなるに伴い流れに乗る状態が強まる24)。この状態はカニ刺網に遭遇し，転向するタラバガニの網地へのてん絡を容易にしていると推察される。

上述のタラバガニの歩行体勢から，甲幅が6.0cm以上のタラバガニが斜め前方へ進み，海底に張り立つカニ刺網に接触する幅γを左右の第3脚の長節長と甲幅との和とし，カニ刺網に接触する高さλを第3脚の前節基部から肢の先端までの長さとすると，タラバガニが直立したカニ刺網に接触する範囲は近似的に$\gamma\cdot\lambda$であり，網地下層と海底との夾角がθ度の場合は$\gamma\cdot\lambda\sin\theta$となる。

甲幅6.0cm 以上のタラバガニの甲幅cとγとの間には図13に示す直線回帰関係が認められる。

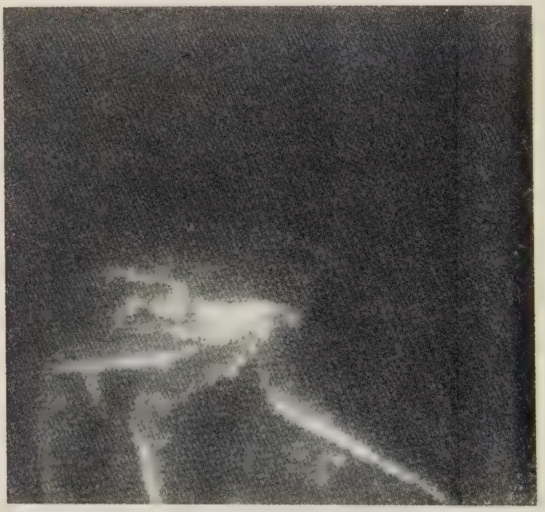
$$\gamma=2.72c-1.65 \quad\cdots\cdots(3)$$

$$\left(\begin{array}{l}\text{雄}:\gamma=2.68\,c-12.64\\ \text{雌}:\gamma=2.17\,c+11.08\end{array}\right)$$

Cとλとの回帰式は次の通りである（図14）

$$\lambda=1.25\,c+9.73 \quad\cdots\cdots(4)$$

$$\left(\begin{array}{l}\text{雄}:\lambda=1.10\,c+30.85\\ \text{雌}:\lambda=2.17\,c+5.30\end{array}\right)$$



図版 1　歩行中のタラバガニ（西村 1966）

Plate 1. A walking king crab (from Nishimura 1966)

網目の幅 A あるいは長さ C と目合 M および縮結 S との理論式

$$A=M(1-S)\cdots\cdots(5)$$

$$C=M\sqrt{S(2-S)}\cdots\cdots(6)$$

によって，目合50.0cmあるいは縮結が0.606である場合について縮結あるいは目合の変化に伴う網目の幅と長さの増減を示したのが図15であり，縮結0.606の場合 $A<C$ である。大小の鋭棘で覆われた体殻と7節からなる8肢を有するタラバガニ[1,9,26–29]がその歩行生態からして，γ が A より大きい場合および γ が A に近似している場合に網地に絡まることなく網目を通過することは難かしいから，図13と図15あるいは3式および5式から網目通過が起りうる最大甲幅が求められて，縮結あるいは目合が異なる各試験網とタラバガニの大きさとの関係について次の仮設が立てられる。

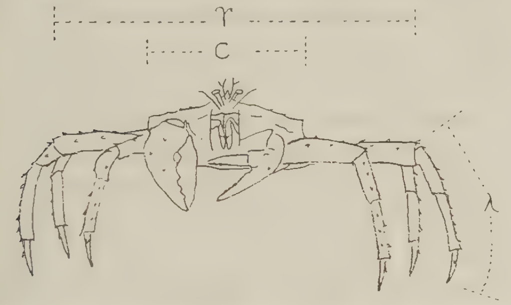


図12　タラバガニの歩行幅 γ および高さ λ を示す模式図

Fig. 12. Diagram to show the width γ and height λ in walking posture of a king crab.

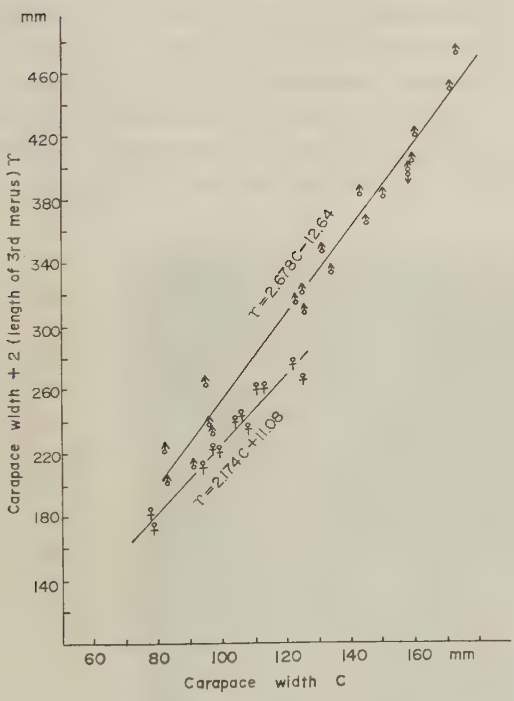


図 13　甲幅 C に対する第3脚の両長節長と甲幅との和 γ の回帰

Fig. 13. Regression of interval γ between outer tips of merus of 3rd ambulatory legs stretched sideways plotted against carapace width c

(i)　タラバガニの大きさに対する選択が起りえない目合3.0cmの魚捕部を付した板曳網の漁獲物中に甲幅6.0cm以下のタラバガニが存在しない（図10および11)。従って縮結0.800. 目合50.0cmの試験網および縮結0.606. 目合30.3cmの試験網の網目をタラバガニは通過しえない。すなわち，網目によるタラバガニの大きさに対する選択は起りえない。

(ii)　甲幅14.0cm未満のタラバガニに対しては. 上記2種の試験網以外の目合あるいは縮結が異なる試験網の間で網目による選択性が相異する。

(iii)　甲幅14.0cm以上のタラバガニはすべての目合あるいは縮結の試験網の網目を通過しえない。すなわち，甲幅14cm以上のタラバガニに対する網目の選択性は全ての目合あるいは縮結の試験網が同じである。

しかし，カニ刺網の網目幅の分布は後述するように一様ではない（図28)。この傾向は漁場では更に助長されるが[10,11]，その要因として下記の条件がある。

(i)　海底に設置した網は1反（4,728cm）につき12ケ所が浮子により吊り上げられ，浮子間浮子綱は垂下し

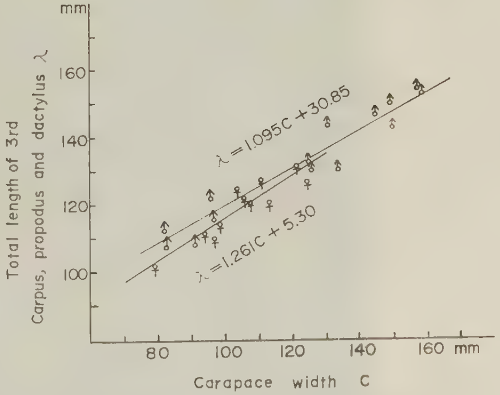


図 14　甲幅 C に対する第3脚の指節腕節および前節の長さの和 λ の回帰

Fig. 14. Regression of total length λ of carpus, prepodus and ductylus of third ambulatory legs plotted against carapace width c

ている。一方，沈子網は沈子により8ケ所が引下げられて着底しているが，浮子下では沈子間沈子網が多少浮揚し，離底していることがある[10]。そのため網地には部分的緊張，弛みが生じ，それらの境界部の網目は歪み，つぶれ，浮子下など緊張部では網目幅が10.4～17.0cmと浮子中間域の19.4～32.0cmより縮小する（図28および29)。

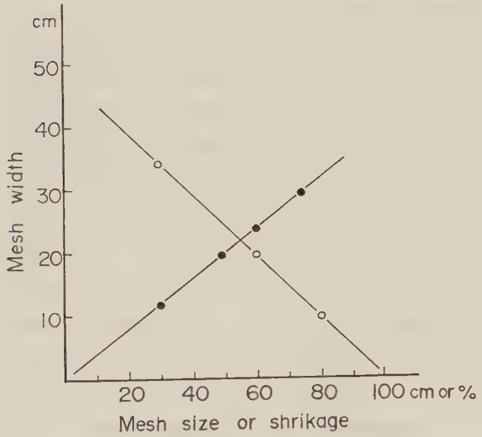


図 15　縮結60.6％の目合（•）あるいは目合50cmの縮結（◦）により与へられる網目幅

Fig. 15. Mesh width given by mesh sizes *M* in the shrinkage of 60.6% (•) or by shrinkages S in the mesh size of 50 cm (◦).

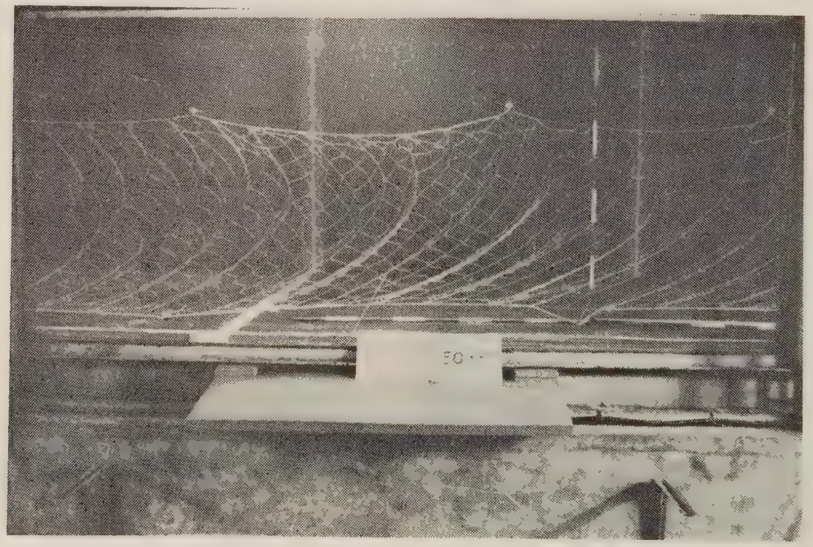
(ii)　1/4模型網は実験時0.4ノットの流れが直角に当たると海底に伏すが，それが網沿ひに流れる場合は直立し，網地が吹きだまる目通糸の結着点では網目の幅がなくなる（図版2および3）。

(iii)　網裾が着底している浮子中間域にタラバガニが罹網した当初は次第にてん絡網地が増加し網を引下げるが[10]　浮子間浮子網の垂下は助長され網目幅を狭めるほか，罹網点附近をはじめとして網目のつぶれが甚だしくなる。

上述の機構によって，目合あるいは縮結の異なる全ての試験網の網目幅が甲幅6.0cmのタラバガニの甲幅と左右の第3長節長との和の近似値あるいはそれ以下にまで縮小することが，タラバガニの網目通過を不可能にし，全ての試験網の漁獲するタラバガニの大きさを同じにしている。つまり網目によるタラバガニの大きさに対する選択性が目合あるいは縮結の相異によっても変らなかった主因になっていると推定される。

2.3.2　網糸の太さによる選択性

網地がビニロン20′s 3/21の試験網とそれが綿糸10′s 3/24の試験網による漁獲試験によって得た結果は既述のように甲幅組成に有意差が認められない。しかし，図9の甲幅組成に示すように，ビニロン20′s 3/21の網より綿糸10′s 3/24の網は甲幅14.5cm以下のタラバガニを少なく漁獲している。このことは反当罹網尾数の両者間の差が雄小型ガニおよび雌ガニで大きいことからも明白であり，そのため漁獲物組成は平均でビニロン20′s 3/21の



図版 2　平行流中にある商業網模型の網目形状

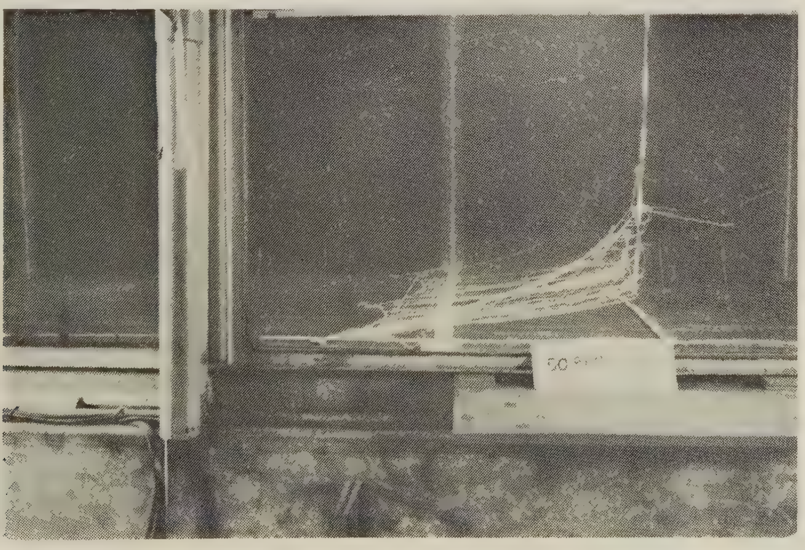
Plate 2. Mesh configuration of commecial model net set up in the parallel flow .

網より綿糸10's 3/24 の網が雄大型ガニで17%多く，雄小型ガニが13%少なくて，夫々の平均値の差は有意であるが，雌ガニは４%少なく有意差が認められない（表８および付表１）。

この問題はタラバガニの大きさによるてん絡性能の相異がビニロン20's 3/21 と綿糸 10's 3/24 の両網地の間で同じであるか否かということで，その解析にはそれに関連した両網地の網糸の物理的性能と同時にタラバガニの形態，感覚，行動とその環境についての知識が必要である。

十脚甲殻類の感覚と行動については多くの研究報告があって，それらの研究成果の概要は Waterman[16] および椎野[15]が集成している。タラバガニの感覚とその器官の研究は竹之内[26]の第１触角の形態についての報告の他は極めて研究成果に乏しい。タラバガニの対網生態と行動については貴重な観察が二・三編ある。加藤[10]の潜水観察によれば〝タラバガニは網に向かって正面または斜めの方向より横歩きで静かに進んで来る。網の前に来ても少しも恐れる様子もなく，また網に突当っても他の魚の様に決して無理に進もうとせず，また暴れもしない。この時，網糸の１～３本が脚の棘あるいは関節にひっかかる。少し前進して進めないとなると正面に向き直るかあるいは斜方向に変じ反対の方向に進まんとする。この時，他の側の脚が網に罹り遂に両側の脚がからんで歩行不能となるか，あるいはひっかからずに斜めの方向に逃げ去るものもある。罹網直後最も多く動く様だが直きに静かになる。罹網しても暴れないためてん絡が容易に進行しない。網に罹り脚を動かしておる中，網から外れて逃げ去るものもある。中には鋏をもって絡んだ糸を解かんとしているものもある〃。

この行為は鳥海船団長（現在日魯漁業kk森工場長）がカニ工船開洋丸上で畜養中の雄大型ガニが体全体に２枚重ねで覆せられたカニ刺網の網地片を解き外すのを観察し，加藤[10]の潜水観察の正当さを裏付けている。しかし，対網行動の記述には著者が水中テレビで観察した行動とは著しく相異する点がある。このテレビ観察は図16に示すように水中テレビ，写真機，照明灯（1000W）を斜探査法で架台に装着し，その前方にはカニ刺網をとりつけ，カニ刺網の下側はテレビ架台に連結した竹竿で固定してある。西村[18]によれば，この網に対するタラバガニの行動は図17に示す通りで設網線を通過する個体が数尾観察された。通過箇所は目通糸と沈子綱との間のようであったがあるいは沈子綱を沿わせた竹竿が船の動揺で離底した時なのかも知れない。テレビカメラの視角が設網線と平行なために過箇所通を確認しにくかった。このテレビ観察中にタラバガニの対網行動が潜水観察[10]の場合と非常に相異した現象は，潜水観察の場合タラバガニは罹網してもおだやかに行動しているのに対し，テレビ観察の際は網沿ひに照明灯に向かって移動してきた中型（甲幅14～15 cm）雄ガニが網端を迂回しようとして，右第４脚が網糸にひっかかり強く網を引っぱり，更に右第３脚も網糸にひっかかって激しい逃避行動を起した点



図版　3　実験流速 0.1 m/sec で倒伏した商業網の 1/4 模型の網成り

Plate 3. Configuration of a quarter scale model of a commercial net nearly fallen on the bottom by the flow of 0.1 m/sec

である。恐らく前者が平常な対網行動であり，後者は強い照明とキャプタイヤーコードを通じてテレビの水中装置と網に伝わる船の動揺に刺激され，おびえた異常行動としてよいと思われる。

次に，使用した網糸の物理的性能を表10に示す。糸に一定の彎曲を与へる力 σ は糸の半径 μ に対して $\sigma=Q\mu^{2.3}$ の関係をもつ[30]。綿10′s 3/24糸はビニロン10′s 3/21糸より直径が約50％長く．両者のQは近似すると思われるので，前者のσは後者の3.8倍と試算される。同じ大きさのタラバガニに対しては細い網糸のほうが絡まり易く，同じ太さの網糸に対しては大きい個体のほうが絡まり易い。とくに，大型個体より行動力の弱い小型個体は網地に絡まりにくいのであろう。

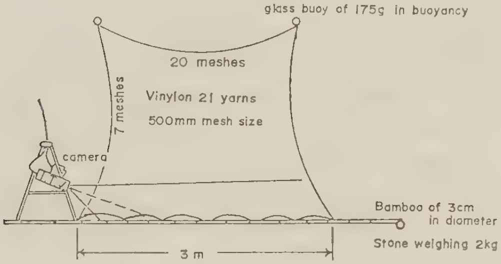


図 16　海底に設置されたテレビカメラとカニ刺網
Fig. 16. king crab tangle nets and television camera laid on sea bottom

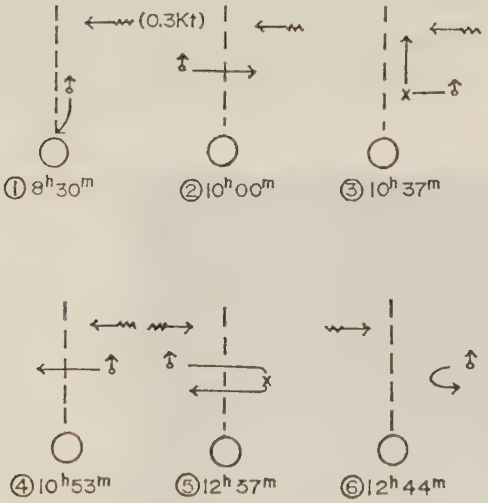


図 17　刺網に対するタラバガニの行動(西村 1966)
Fig. 17. Observation of behaviour of king crabs to the tangle net with television (from Nishimura 1966)
……：Tangle net.　○：Television camera.
←⁓：Direction of current.
×：stoping for a moment.
♂→：Diection of movement of a male crab.

表8によると，綿糸10′s 3/24の網はビニロン20′s 3/21の網に比べ，反当罹網尾数が雄大型ガニで稍少ないが，雄小型ガニおよび雌ガニでは半分以下に減少する。つまり，綿糸10′s 3/24の網地のてん絡能力は大型ガニより小型ガニに対して著しく悪くなっている。

綿糸はビニロン糸に比べ膨張収縮し易く，水中で目合が少し縮小する。また網地の水中重量が少し大きい。しかし，これらは網目による選択性によって綿糸10′s 3/24の網がより小さいタラバガニを選択する理由として考えることが出来ても，より大きいタラバガニを選択する原因とはなりえなく，実験結果とは相反するものである。ビニロン糸は合成繊維中最も綿糸に近い物理的性能を具備し，両糸の材質上の物理的条件の差異は僅少である。両糸の色彩はビニロン糸が白色，綿糸が淡褐色である。実験水域は50m以深で，底層の照度は1 lux以下[18]，海底における視程が2m以下[10,31]である。十脚甲殻類が有する複眼の解析力[15,16]を考慮すると，両糸の色彩あるいは太さの差がタラバガニの対網行動に及ぼす効果の違いは微少と判断して論外におく。

十脚甲殻類の聴覚および触覚の研究概要はWaterman[16]および椎野[15]が集成している。タラバガニおよびズワイガニが発生する生物音響[32,33]は録音されていて，それがタラバガニの場合は雄が発する高周波音であることが証明されている。流動する海水中において網糸の太さが異なる両網地から生ずる低周波の振動の差がタラバガニの対網生態に及ぼす影響の差は微小と考え，これも論外におけるであろう。

3.　予備浮力，網目の展開 および脚張力の分布

カニ刺網は上縁に浮子を，下縁に沈子を付した帯状の網具で，浮子の浮力を超えた沈子の沈降力は海底に吸収され，網の沈降力を超えた浮子の浮力すなわち予備浮力は沈子に吸収され，釣り合い，海底に張り立つ。

カニ刺網の各部において，静荷重による降下は静荷重が予備浮力を超えると始まるから，一定微小距離だけ降下させる静荷重の分布型はカニ刺網の予備浮力の分布型と考えうる。

刺網の余剰浮力と網地の張力については宮本[34]および野村[35,36]が報告している。野村によれば，身網の上縁の

表 10　試験網1反の網糸および棚の物性

Table 10. Material conditions of twines and lines of experimental nets a tan

Twine & line Condition	Netting twine vinylon 20's 7/×3/Z*	 Cotton 10's 8/×3/S	Sinker line Manila iwaito 2×3/Z	Float line Manila twine 3/2	Poach line Vinylon 20's 11/×3/Z
Diameter　m/m	1.19	1.81	9.00	2.9	1.5
Weight　g/m	0.79	1.52	44.50	4.95	1.42
Specific gravity	1.30	1.54	1.45	1.45	1.30
Color	white	Cutch	Green blue	Cream	White

* Resin treatment

単位の長さについて，浮子の浮力がf，浮子網と上部の縁網との水中重量がW_1，沈子網と下部の縁網とおもりなどの水中重量がW_2，身網の水中重量がWで網丈がhのばあい，この刺網が水中で釣合うならば，$f=W_1+W+W_2$であって，身網の上縁からZのところの網地の張りの強さは上下に

$$f-W_1-W\times\frac{Z}{h}=W\left(1-\frac{Z}{h}\right)+W_2$$

である。この刺網に余分の浮力を加えれば浮刺網となり余分のおもりを加えれば底刺網となる。目合を$2L$，縮結を$1-\cos\varphi$，脚の張りの強をτとすると，網地の張りは上下に

$$\frac{2\tau\ \sin\ \varphi}{2L\ \cos\ \varphi}=\left(\frac{\tau}{L}\right)\times\tan\ \varphi$$

となるから，脚の張りのつよさは，

底刺網では$\left(f-W_1-W\frac{Z}{h}\right)L\ \cot\ \varphi$

身網の上縁の最大値は$(f-W_1)L\ \cot\ \varphi$となる。

網地にかかる外力の伝播の仕方については近藤[37]および Takenouti[38]の研究がある。近藤が得た実測値によれば，張力は荷重の作用点を通る脚線上にのみ主として伝わり，他へは一部しか伝わらない。また，サケ流網の網地の張力は上下の縁網で強く，その分布型は既述の野村の理論によるものとは明らかに相異する。

上述の過去数編の研究報告を参照しても，浮子の装着間隔が広いカニ刺網における予備浮力分布を明確にするには，なお多数の部位について測定値を必要とする。このように多くの測定を行なうには普通の場合，水中より地上のほうが容易であることは言うまでもなく，この実験において地上における多くの測定値を照合する方法をとった理由もそこにある。

3.1　実験方法

3.1.1　材　料

表11〜13に模型網とその付属具の構造および静力学的条件について要目を示す。

1)　商業網模型

模型網の線寸法は網糸の直径を含め総て実物網の¼とした。ただし，網付長は浮子方350 cm，沈子方320 cmで切った。

2)　基本網模型

縮結を浮子方0.33，沈子方0.39とした点のみ商業網模型と異なる。

3)　浮子

材料の都合で実物の水中浮力の$(1/4)^3$より約10%過大な，水中浮力3 g，直径2 cmのスチロール球を用いた。

4)　気球

気球製作所製マイラー（ポリエステル系フイルム）バルーンにヘリウムガスを封入し，空中浮力が5.6 gになるようにバラストで調整した。気球の浮力は浮子の浮力より商業網模型の重量が水中より空中で増した分だけ大きくした。

5)　沈子

57 g の円筒型鉛

6)　荷重

0.05〜5.00 g の錘（鉛線）

3.1.2　方　法

1)　地上測定

実験した東海区水産研究所の室温は18〜22℃であった。実物網に対する浮子および沈子の装着法と同様，1枚の模型網には5箇の気球を浮子網の目通糸結着点中間部に等間隔に結着し，沈子は沈子網に4箇を等間隔に結

付するか，沈子結着間隔を気球結着間隔の1.5倍にして沈子の位置が気球の直下と中間部とに交互になるようにした。原則的に測定対象網の両隣には夫々他の模型網を連結して設網全長を12m にし網の形状を撮影，計測の後，網地の結節および浮子綱の各部位について10cm だけ静かに降下させる錘（以下では10cm 降下静荷重と呼称する）L_i の重量を測定した（図版4～6）。

L_iの測定に先立って下記の方法による補助実験を行なった。

(i)　各気球の浮力B_fが8.6gから1gきざみで減少する毎に，商業網模型の中央部に位置する気球と浮子綱との結着点を10cm降下させる静荷重L_fを計測して，B_fが5.6g以上では変量$\varDelta L_f$と$\varDelta B_f$がほぼ等しいことを確認した。なお，詳しくは後に述べる。

(ii)　商業網模型中央の気球結着点，基本網模型中央の気球結着点中間部最上結節および気球直下の上から3番目の結節において，錘が1g増す毎に測定部位が降下する距離および10cm降下当りの錘の重量を測定した。

網目の展開（網目開き）の測定には地上に張り立てた模型網の形状（網成り）が水中における形状と近似している（図版4および7）ことから，前者の網目の水平および垂直最大距離を計測し，その値を引き伸ばして実物網の網目の幅と長さを表わした。

2)　水中測定

実験は東海区水産研究・（現在は水産工学研究所勝どき庁舎）の大型曳航水槽(長さ35m，幅4m，深さ3m)の清水（20℃）中で行なった。地上測定と同じ方法で浮子を結付し，沈子は4箇を等間隔に結付して基本網模型を水中に張り立てた。ただし，水中測定とそれに対応させた地上測定では測定対象網の両隣に他の模型網を連結しなかった。網成りを撮影（図版7）してから，図23に示す水中測定部位において結節を10cm降下させる錘の水中重量を測定した。

3)　予備浮力の算出

気球の予備浮力b_fが$\varDelta b_f$だけ変化した時のL_fの変化を$\varDelta L_f$とすると，$b^f+\varDelta b_f \fallingdotseq b_i$，$L_f+\varDelta L_f=L_i$のとき，$\varDelta b_f=\varDelta L_f$であるから$L_f-b_f=L_i-b_i$となる。従って，表13から$b_f$および$L_f$の測定値を次式に代入して商業網模型の任意の部位における予備浮力b_iが算出される。

$$b_i=b_f+L_i-L_f=2.1+L_i-3.3=L_i-1.2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

商業網の浮子1箇の予備浮力を$_pb_f$とすると次の関係がある。

$$\frac{_pb_f}{b_f}=\frac{_pb_i}{b_i}$$

従って，次式に表13から測定値を代入し，商業網の任意の部位の予備浮力が算出される。

表 11　1/4模型網の要目

Table 11. Principal itemes of model nets of a quarter scale

Part names	Basic model net	Commercial model net
Netting	Vinylon, 0.3mm in diameter. 115mm in mesh size. 7 meshes deep. 46 meshes in length.	Vinylon, 0.3 mm in diameter. 115 mm in mesh size. 7 meshes deep. 80 meshes in length.
Poach line	Vinylon, 0.3 mm in diameter. Tied every other mesh.	vinylon, 0.3 mm in diameter. Tied every third mesh in float side and every fourth mesh in sinker side.
Float line	Vinylon 20's 4/×3/Z. 3.5 m in length with netting.	Same as left.
Sinker line	Vinylon 20's 12/×3/Z. 3.2m in length with netting.	Same as left.
Hanging	33% in float side. 39% in sinker side.	62% in float side. 65% in sinker side.
weight	15.6 g in air. 3.0 g in water	18.8 g in air. 3.8 g in water.

表 12 商業網模型の構成

Table 12. Structure of a quarter model of a commercial net

Part names	Structure
Netting	Vinylon, 0.3 mm in diameter. English knot. 115 mm in mesh size. 7 meshes deep. 80 meshes in length.
Float line	Vinylon, 0.9 mm in diameter. 3.5 m in lengh with netting.
Sinker line	Vinylon, 1.7 mm in diameter. 3.2 m in length with netting.
Poach line	Vinylon, 0.3 mm in diameter. Tied every third mesh in float side and every fourth mesh in sinker side.
Float	Styrene ball of 20 mm in diameter and 3 g in buoyancy.
Sinker	Cylindrical lead weighing 57 g.
Balloon	Polyester balloon filled helium gas, buoyancy is 5.6 g.

$$ {}_pb_i = b_i \cdot \frac{{}_pb_f}{b_p} = b_i \cdot \frac{136.8}{2.1} = 65\,b_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

4）脚張力の算出

網目の水平・垂直最大距離と結節間の距離が近似している浮子下および浮子中間部の14目について脚張力を次の方法により求めた。

脚長 l，網目幅 A，網目長 C および結節予備浮力 ${}_pb_i$ が判っているので，脚張力 T は次式により与へられる（図18）[39,40]。

$$ T = \frac{{}_pb_i}{2\cos\varphi} = {}_pb_i \cdot \frac{l}{C} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

3.2 結果と考察

3.1.2 気球結着点における10cm降下静荷重と気球浮力との関係

B_f と L_f との関係を示す図19によれば．B_f が3.6gから8.6gまでの範囲すなわち b_f が0以上の範囲では．L_f と B_f あるいは b_f との間に

$$ L_f \fallingdotseq B_f - 2.0 = b_f - 1.5 $$

$$ \Delta L_f \fallingdotseq \Delta B_f = \Delta b_f $$

の関係が認められる。

なお．測定対象網の B_f が3.5g以下すなわち b_f が0以下になっても地面に伏すことなく，浮子網の高さは減ずるが，張り立っている。これは気球浮力が5.6gに固定されている両隣に連結した模型網の浮力に支えられているためである。しかし，b_f が0以下になると $\Delta L = \Delta B = \Delta b$ という関係が失なわれ，かつ測定部位が動揺し易く L_f の計測が難かしくなる。

3.2.2 静荷重と降下距離との関係

測定部位は次の3点である。

（i） 地上に張り立てた基本網模型の気球結着点間の中央部（以下では気球中間部と呼称する）で，高さ54.5cmに位置する網地の最上結節。

（ii） 地上に張り立てた基本網模型の気球結着点直下（以下では気球下と呼称する）で．高さ44.5cmに位置する上から3番目の結節。

（iii） 地上に張り立てた商業網模型の気球と浮子網と

表 13 実物網および 1/4 模型網の静的条件

Table 13 Static conditions of the full scale net* and a quarter model net**

Items	Model net	Full scale net
Buoyancy of a balloon	5.6 g	
Weights of netting and float line for a balloon	3.5	
Spare buoyancy of a balloon	2.1	
Buoyancy of a float	3.0	175.0 g
Under water weghts of netting and float line for a float	0.7	38.2
Spare buoyancy of a float	2.3	136.8

* Showed in table 4.

** Showed in table 12.

の結着点

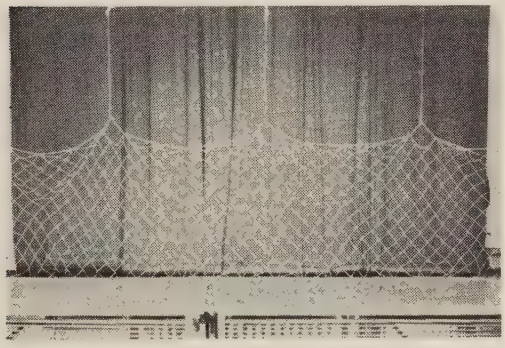
測定結果を図20に示す。

気球中間部最上結節にかける錘の重量を1gづつ増した場合，その結節の降下距離は僅かづつ減ってゆき，網地中層で極小（3cm）となるが，再び僅かづつ増加しながら，やがて着底する。同じ結節について降下距離を10cmづつ増してゆくのに要する錘の重量は最初2.2gであるが，次の10cm降下では31.5gと最大荷重を必要とし，それ以降では減少傾向を示す。これら両測定法における結節にかかる静荷重との結節の高さとの関係は1本のゆるやかな曲線で示される。

気球下の上から3番目の結節の場合，そこにかける静荷重を1gづつ増しても当初，結節は殆んど降下しないが僅かづつ降下距離が増してゆき．降下距離が10cmに達した後は静荷重の増重1g当りの降下距離は5～6cmに一定する。この結節の降下距離が10cmに達した後，その降下距離を10cmづつ増す静荷重は約1.5gと一定で，そのプロットはこの結節にかける静荷重を1gきざみで増した場合のこの結節の高さの減少直線に乗る。

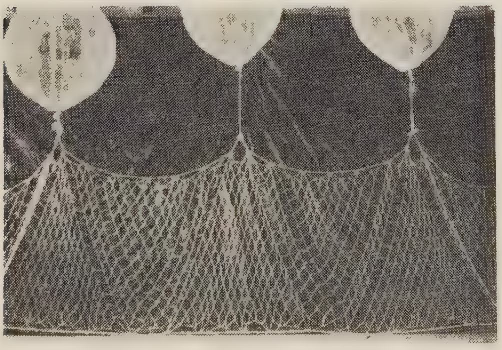
浮子綱と気球との結着点は無荷重の状態では気球の浮力が集中しているため最も高く89cmに位置する。静荷重が2g以下すなわち気球の予備浮力以下の間，その高さは殆んど減じない。静荷重が3～6gでは1g当り降下距離が11～14.5cmと極めて大きい。静荷重が7.0gから12.7gまでの範囲の1g当り降下距離は一定で直線的に降下してゆき着底する。最初の10cm降下点は3.3gで，1g当り降下距離が増大する初期に相当している。

以上の静荷重と降下距離との関係を表す3本の線は次のように整理される。当初，測点の高さが荷重によって殆んど変らない水平直線，次に降下距離が増加してから減少する降下曲線，終りに着底付近まで降下距離が一定する降下直線に区分けされる。但し，網地がたるんでいる部位（気球中間部上層網地）では水平直線がなく，先ず降下してから降下曲線になる。水平直線期ではその部



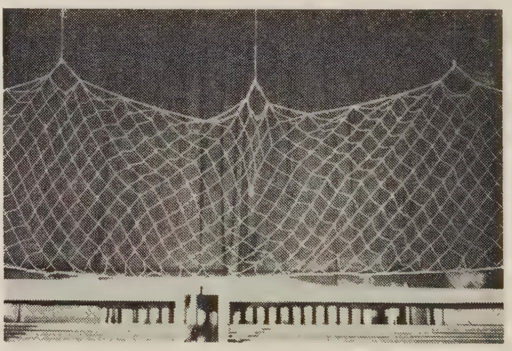
図版　4　地上に張り立てた基本網模型の網成り

Plate 4. Configuration of basic model net set up on the ground



図版　5　地上に張り立てた商業網模型の網成り

Plate 5. Configuration of commercial model net set up on the ground



図版　6　気球下の上から3番目の結節に錘をかけて10cmだけ降下させた状態

Plate 6. Equilibrium configuration lowered the knot three as counted from top under a balloon, for 10cm by action of weight

図版　7　水底に張り立てた基本網模型の網成り

Plate 7. Configuration of basic model net set up on the bottom of water

位の予備浮力が静荷重より大きく，水平直線の長さはその部位の予備浮力の大きさに比例し，降下曲線期以後には予備浮力より静荷重が大きく，その外力の伝播範囲は降下するにつれ拡大すると考えられる。

10cm 降下点は静荷重が予備浮力を超えて降下し始めた降下曲線期の初期に位置する。予備浮力b_iを知るための静荷重 L としては L が b_i を超え，かつその外力の伝播範囲を狭めるという視点からは可及的に小さいことが望ましいが，本実験では計測が容易な10cmの降下距離を採用している。

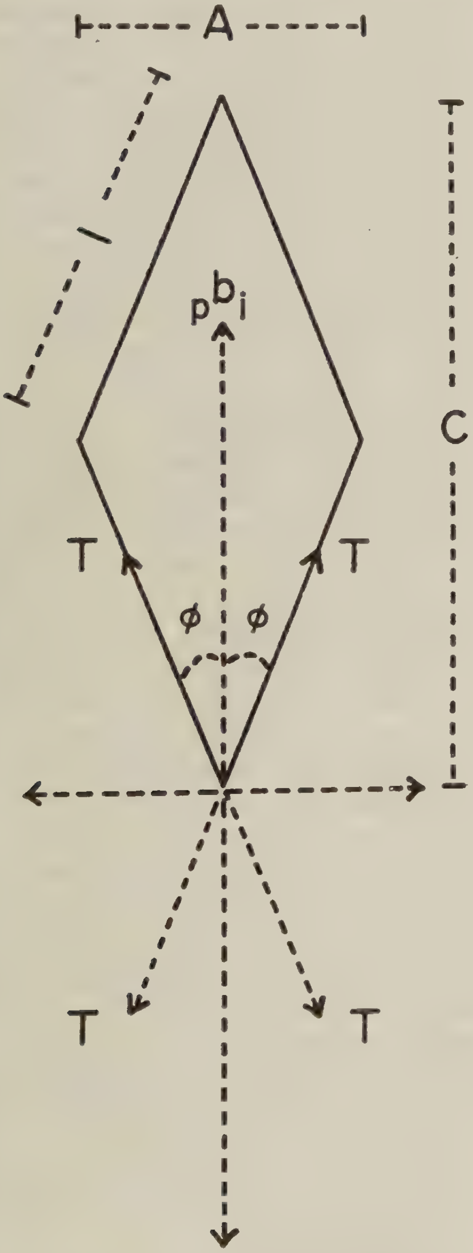


図 18　直立したカニ刺網の網目要素

Fig. 18. Mesh elements of a king crab tangle net which is set perpendicularly up

3.2.3　網にかかる気球浮力の伝達過程

図21に地上に張り立てた基本網模型における10cm降下静荷重(g)の分布を示す。ただし，この実験では沈子の結着位置が気球の直下と中間部とに交互になるように配置されている。また，この実験で基本網模型を用いたのは気球の浮力が模型網の各部へ伝播してゆく過程を模式的に理解するのが，縮結の多い商業網模型より容易であるからである。

10cm降下静荷重は1.6gから6.8gまでの範囲にある。浮子網ではその範囲が2.5gから4.9gまで，気球下で極大，気球中間部で極小となり，気球結着点からへだたり，浮子網が垂下するほど減少する。

浮子網の予備浮力は主に結直点から左右へ斜降する脚線36)（以下ではこれらを夫々左斜降糸および右斜降糸と呼称する）に沿って伝播している。このことは目通糸に上方支点を有する斜降糸についても同様である。

図22に各斜降糸の10cm降下静荷重の平均値．浮子網

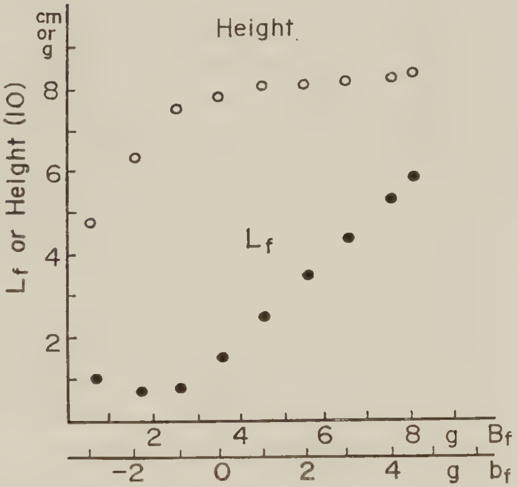


図 19　地上に張り立てた商業網模型の気球浮力 B_f あるいは気球予備浮力 b_f と気球結着点の10cm降下静荷重 L_f あるいは高さとの関係

Fig. 19. Relation between buoyancies B_f or spare buoyancies b_f of balloons and static loads L_f which lower the joining position of a balloon on float line for 10cm or height of the joinig position on commercial model net set up on the ground with balloons

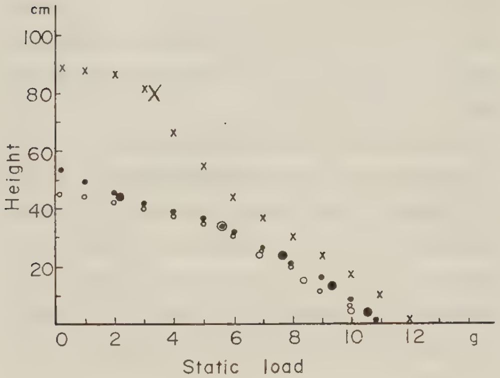


図 20　地上に張り立てた模型網の荷重による荷重点の降下

Fig. 20. Descent of the parts by action of weight on model nets set up with balloons, on the ground
• : The top knot of middle between balloons
○ : Knot three as couted from top under a balloon
× : Tied position of a balloon.
Large symbol : Static load which lowers for 10 cm

の10cm降下静荷重および浮子綱と目通糸の高さを示す。図22によれば．各斜降糸の10cm降下静荷重の平均値は，斜降糸と浮子綱あるいは目通糸との結着点における浮子綱の10cm降下静荷重および高さに相応して増減する。斜降糸の降下静荷重の平均値は斜降糸の上方支点が気球下に位置する場合に大きく，その支点が気球中間部に近付くに伴い，1つおきに増減をくりかえしながら，減少してゆく。斜降糸の10cm降下静荷重の平均値に交互の増減が生ずるのは，目通糸が浮子綱に対し，たるみをもたせて沿わせ，結着されているため斜降糸と目通糸との結着点が，その左右に隣接する斜降糸より少し低くなっていて，斜降糸の上方支点が浮子綱と目通糸と交互になっていることに因る。

このようにして，結節予備浮力の小さい区域は，予備浮力の小さい斜降糸で構成されている気球中間上層域の網地に形成され，下方の予備浮力の大きい左右斜降糸によりもち上げられた状態にとなっているため，逆三角形状を呈する。予備力浮の最小点はこの逆三角形の底辺中央部つまり気球中間部最上結節にあり，最も大きい予備浮力を有する結節は，予備浮力の大きい斜降糸の交点である前記の逆三角形の頂点の下に出現している。

3.2.4　地上における予備浮力の分布型と水中におけるそれとの比較

図23に地上および水底に張り立てた基本網模型の結節における10cm降下静荷重を示す。図24は図23の静荷重分布が水中と地上とで一致する程度を示すために，両者の予備浮力指数（最大荷重に対する各荷重の百分率）が併記してある。なお，沈子は沈子網の網付長（3.2m）を3等分するように配置した。

図24は一見して水中における予備浮力の分布型が地上におけるそれと相似していることが判る。両者の相関係数は0.92で強い相関関係が認められる。網地の最上部に位置する結節の予備浮力指数は浮子下から浮子中間部の最小値に向かい1つおきに増減をくりかえしながら減少してゆく。浮子中間部の予備浮力指数は最上結節に最小値があり，下へ向かい増加し，網地中層に最大値があらわれる。なお，この実験法で予備浮力の分布型を求める場合，地上では比重が小さく，細くかつ柔軟な材料を用い，水中では比重が大きく，太くかつ硬い材料を選定しうれば，水中と地上との予備浮力の分布型はより一致すると考えられる。

3.2.5　商業網の予備浮力分布

図25に地上に張り立てた商業網模型の結節における10cm降下静荷重の分布を示す。ただし，沈子は沈子網の網付長を3等分するように結付してある。図26は図27から（7）式によって算出した予備浮力の分布で，予備浮力は−0.3〜2.8gである。

気球浮力の網への伝達機構は基本網模型のそれと原理的に同型であり，各結節の予備浮力はそれらの結節を通る左右斜降糸の上方支点の高さに応じて増減し，予備浮力の最小点は気球中間部最上結節にあらわれる。しかし，商業網模型の場合，網目の縮結角[35,36)]*が小さく，各斜降糸が基本網模型より下方に向かうため，予備浮力の大きい区域は上方支点が高い斜降糸で構成されている気球下域に集中し，上方支点が低い斜降糸で構成されている気球中間域では予備浮力が小さく，基本網模型の網地にみられた気球中間部中層の最大予備浮力点は出現しない。また，気球中間部上層の網地は下方から予備浮力の大きい左右斜降糸にもち上げられ，たるむための負の予備浮力域が逆三角形状に形成される。上述のように，商業網模型では予備浮力の大きい気球下の三角形域と予備浮力の小さい気球中間の逆三角形域とに区分される。

予備浮力の分布型は水中と地上とで近似する。従っ

---

* $\sin\varphi=\dfrac{l(1-S)}{l}=1-S$

ただし，l：脚の長さ，S：縮結，φ：結節直上の2脚の夾角の½

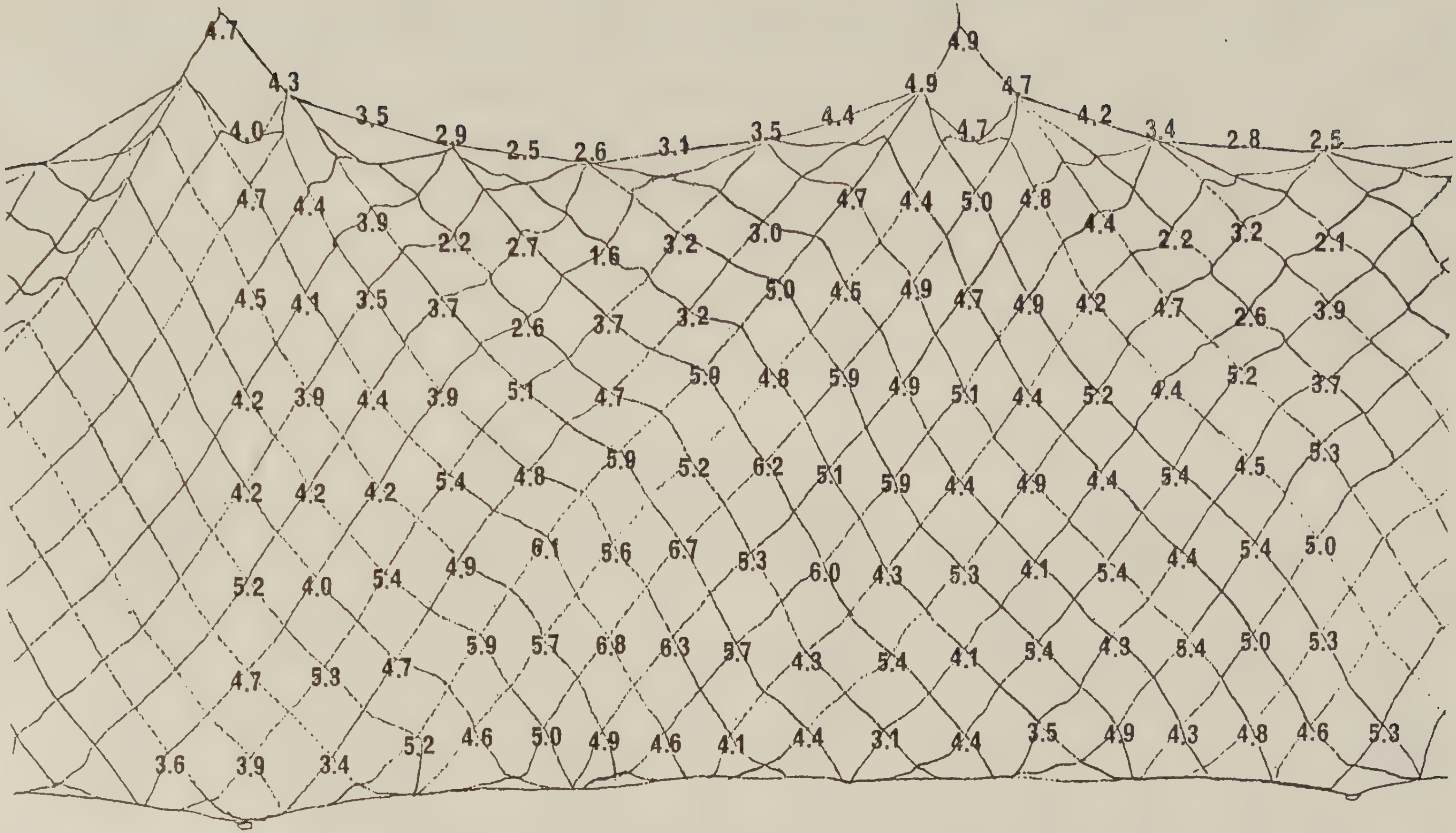

4.7 4.9
4.3 4.9 4.7
3.5 4.4 4.2 3.4
4.0 2.9 2.5 2.6 3.1 3.5 4.7 2.8 2.5
4.7 4.4 3.9 2.2 2.7 1.6 3.2 3.0 4.7 4.4 5.0 4.8 4.4 2.2 3.2 2.1
4.5 4.1 3.5 3.7 2.6 3.7 3.2 5.0 4.5 4.9 4.7 4.9 4.2 4.7 2.6 3.9
4.2 3.9 4.4 3.9 5.1 4.7 5.0 4.8 5.9 4.9 5.1 4.4 5.2 4.4 5.2 3.7
4.2 4.2 4.2 5.4 4.8 5.9 5.2 6.2 5.1 5.9 4.4 4.9 4.4 5.4 4.5 5.3
5.2 4.0 5.4 4.9 6.1 5.6 6.7 5.3 6.0 4.3 5.3 4.1 5.4 4.4 5.4 5.0
4.7 5.3 4.7 5.9 5.7 6.8 6.3 5.7 4.3 5.4 4.1 5.4 4.3 5.4 5.0 5.3
3.6 3.9 3.4 5.2 4.6 5.0 4.9 4.6 4.1 4.4 3.1 4.4 3.5 4.9 4.3 4.8 4.6 5.3

図 21　地上に張り立てた基本網模型の荷重点を10 cm 降下させる静荷重 (*g*) の分布

Fig. 21. Distribution of static loads (*g*) which lower for 10 cm on basic model net set up on the ground

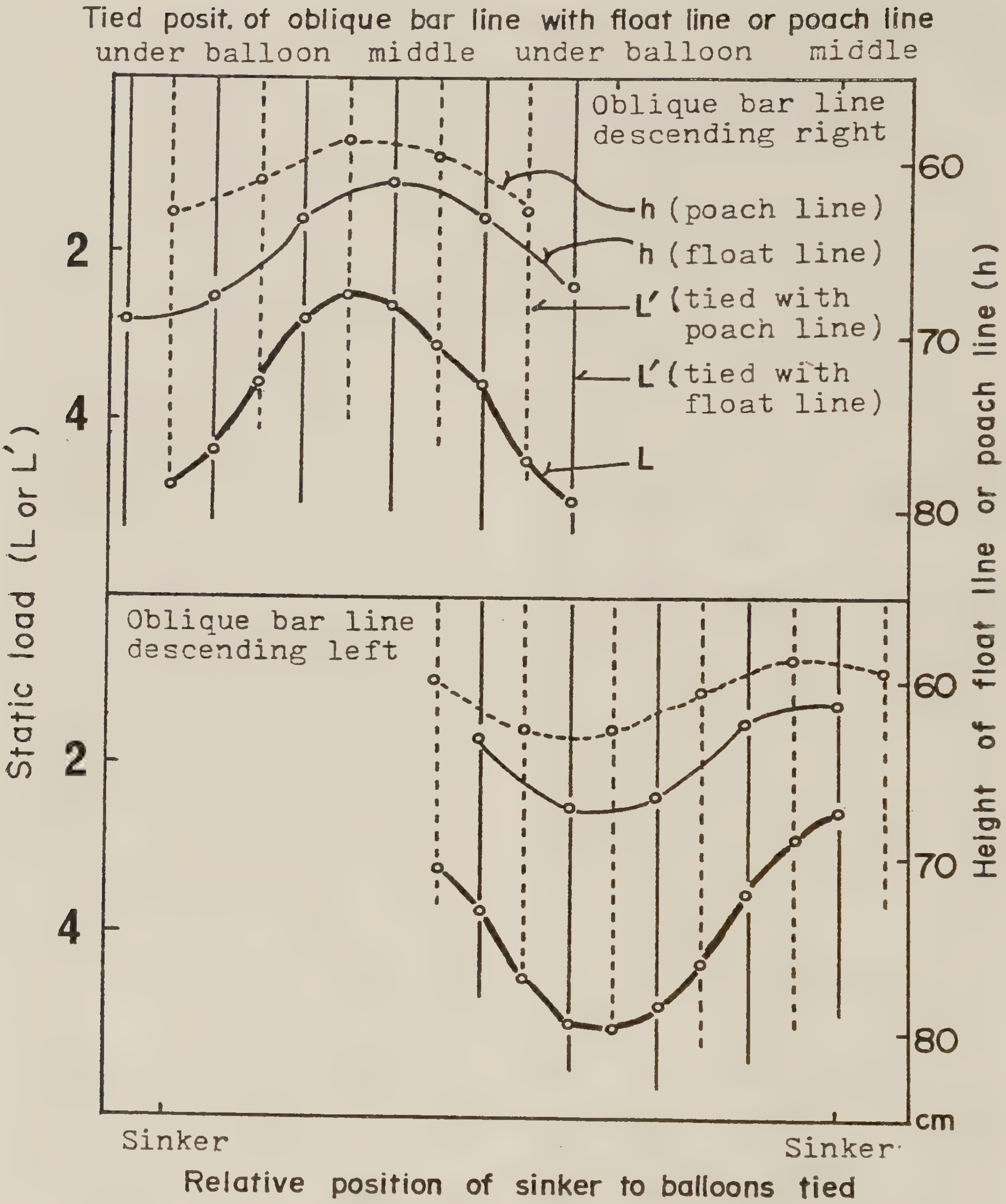


図 22 斜降糸の10 cm降下静荷重の平均値 (*g*) *L*′，浮子綱の10 cm降下静荷重 (*g*) *L* および浮子綱と目通糸の高さ *h* における位置関係

Fig. 22. Relation among average static loads (*g*) *L*′ which lower knots for 10cm in oblique bar lines, static loads (*g*) *L* which lower for 10cm on float line, and heights *h* of float line or poach line on basic model net set up on the ground

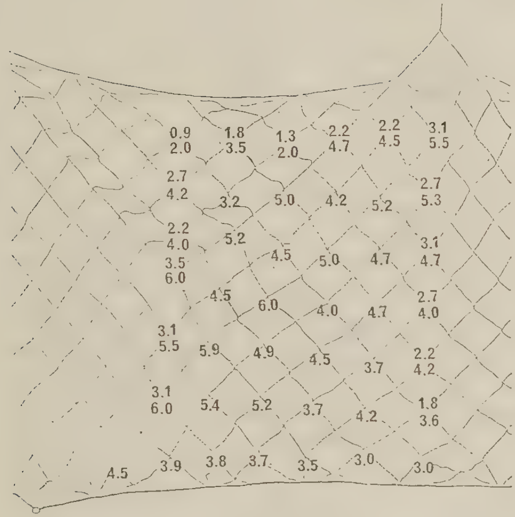

0.9
2.0
1.8
3.5
1.3
2.0
2.2
4.7
2.2
4.5
3.1
5.5
2.7
4.2
3.2
5.0
4.2
5.2
2.7
5.3
2.2
4.0
5.2
3.5
6.0
4.5
5.0
4.7
3.1
4.7
4.5
6.0
4.0
4.7
2.7
4.0
3.1
5.5
5.9
4.9
4.5
3.7
2.2
4.2
3.1
6.0
5.4
5.2
3.7
4.2
1.8
3.6
4.5
3.9
3.8
3.7
3.5
3.0
3.0

図 23　地上（下段）および水底（上段）における10cm降下静荷重（*g*）の分布

Fig. 23. Distribution of static loads (*g*) which lower knots for 10cm on basic model net set up on the ground (values in lower) and bottom of water (values in upper)

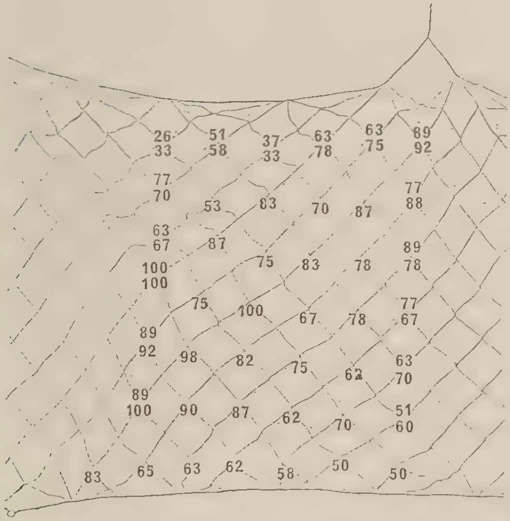

26
33
51
58
37
33
63
78
63
75
89
92
77
70
77
88
53
83
70
87
63
67
87
89
78
100
100
75
83
78
78
75
100
67
78
77
67
89
92
98
82
75
62
63
70
89
100
90
87
62
70
51
60
83
65
63
62
58
50
50

図 24　図23における予備浮力の分布型

Fig. 24. Distribution of spare buoyant indexes obtained by percentages of loads to the maximum load on Fig. 6

て，海底に直立したカニ刺網の各部位の予備浮力は地上に張り立った商業網模型の該当部位の予備浮力に，実物網の浮子の浮力の模型網の気球の浮力に対する倍率(65)を掛けることによって表しうる。図27によれば，商業網の予備浮力は－20gから182gまでの範囲にある。浮子綱ではその範囲が58gから137gまでで，浮子結着点で極大，浮子中間部で極小となり，浮子結着点からへだたるほど浮子綱が垂下し，浮子綱予備浮力が減ずる。この様に浮子の浮揚力は浮子下の網地に集中し，予備浮力の大きい結節は浮子下の三角形域に分布し，浮子中間域では結節予備浮力が小さい。

網に遭遇したタラバガニが接触すると考えられる網地下層1.5目の結節予備浮力は浮子中間域で52〜111g，浮子下域130〜169gでであり，浮子下域の下層で135〜169gであり，浮子下域の下層では結節予備浮力が雌ガニおよび仔ガニ（甲幅13cm以下）の海中体重[19]（100g以下）を超える。なお，このことと漁獲性能との関係については次章でふれる。

3.2.6　網目の長さおよび幅の分布

図28および29には夫々張り立てた商業網の網目の幅および長さ（以下夫々網目幅および網目長と呼称する）を示す。

網目幅は7.2cmから28.8cmの範囲に，網目長は22.8cmから53.2cmの範囲にある。浮子下の斜降糸の上方支点は浮子綱が浮子によって引き上げられている部分に結着されているため，浮子下の網目は幅が狭く，長さが長い。一方，浮子中間域では網目幅が広い。これら浮子下域と浮子中間域とは夫々前者が結節に大きな予備浮力を有する三角形域に，後者が結節予備浮力が小さい逆三角形域にほぼ該当する。

これら両域の境界部では網目の左右の結節の高さおよび網目の左右の脚の張力と傾斜の相違により網目の形状が著しく歪む。これらの歪みはそこの結節で交叉する左右の斜降糸の上方支点の高さが著しく相違することに因るが，浮子下および浮子中間部では各斜降糸の上方支点が等高であるために網目の左右および上下の結節間隔が夫々網目幅および網目長に一致していて網目の歪みは殆んどない。

海底に張り立っているカニ刺網に遭遇したタラバガニが接触する網地下層では網目幅が10.6〜32.0cm，網目長が23.2〜48.0cmで，網目は浮子下で幅が狭く，10.6〜17.0cm 長さが長く，30.0〜48.0cm，浮子中間域では幅が広く，19.4〜32.0cm位である。

3.2.7　脚の張力

商業網の結節予備浮力（図27），網目の長さと形状（図

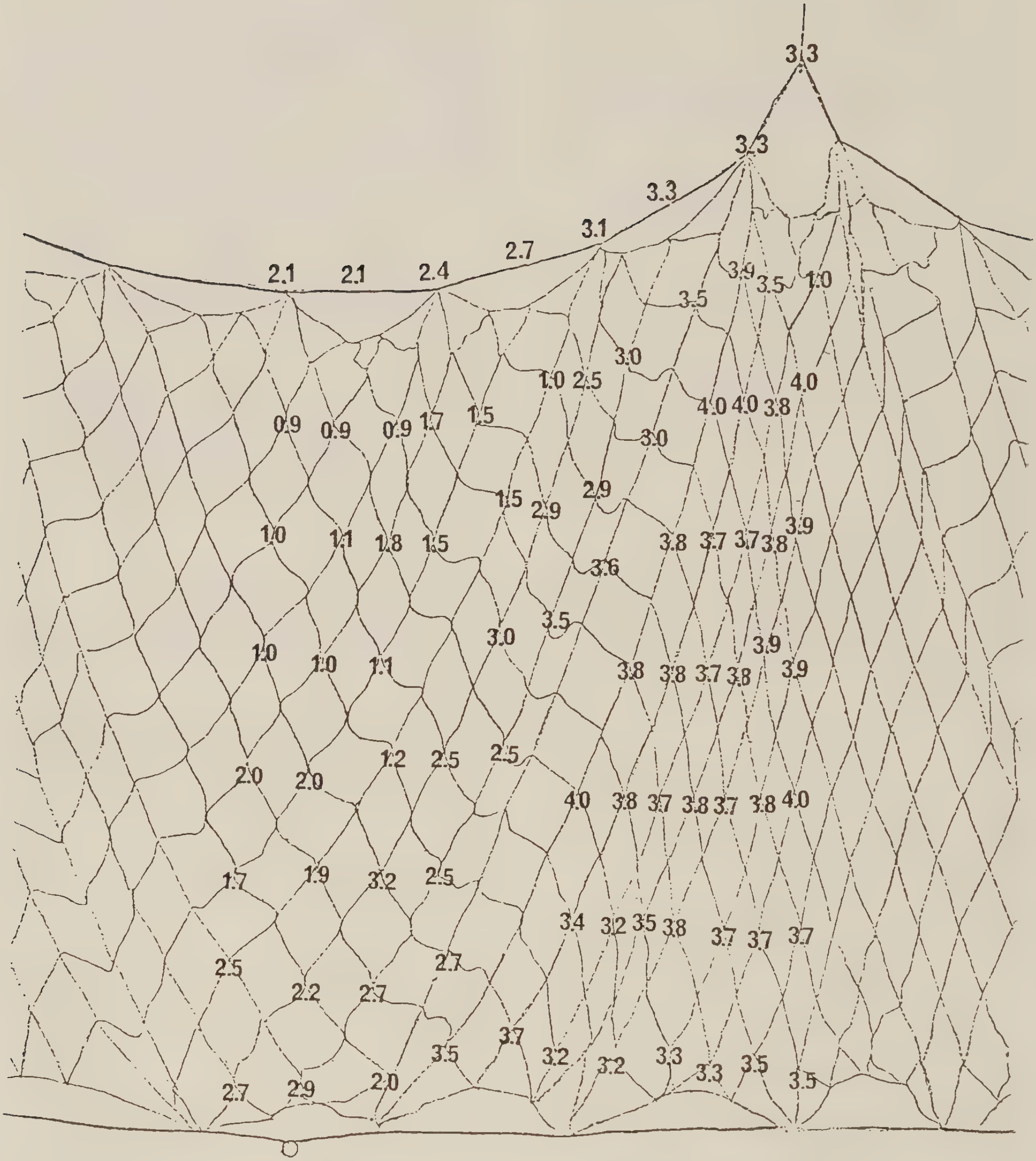

3.3
3.3
3.3
3.1
2.7
2.1
2.1
2.4
3.9
3.5
1.0
3.5
3.0
1.0
2.5
4.0
4.0
4.0
3.8
0.9
0.9
0.9
1.7
1.5
3.0
2.9
1.5
2.9
3.9
1.0
1.1
1.8
1.5
3.8
3.7
3.7
3.8
3.6
3.5
3.0
3.9
1.0
1.0
1.1
3.8
3.8
3.7
3.8
3.9
1.2
2.5
2.5
2.0
2.0
4.0
3.8
3.7
3.8
3.7
3.8
4.0
1.7
1.9
3.2
2.5
3.4
3.2
3.5
3.8
3.7
3.7
3.7
2.5
2.7
2.2
2.7
3.7
3.5
3.2
3.2
3.3
3.3
3.5
3.5
2.7
2.9
2.0

図 25　地上に張り立てた商業網模型の10cm降下静荷重（*g*）の分布

Fig. 25. Ditribution of static loads (*g*) which lower the parts imposed for 10cm on commercial model net set up on the ground

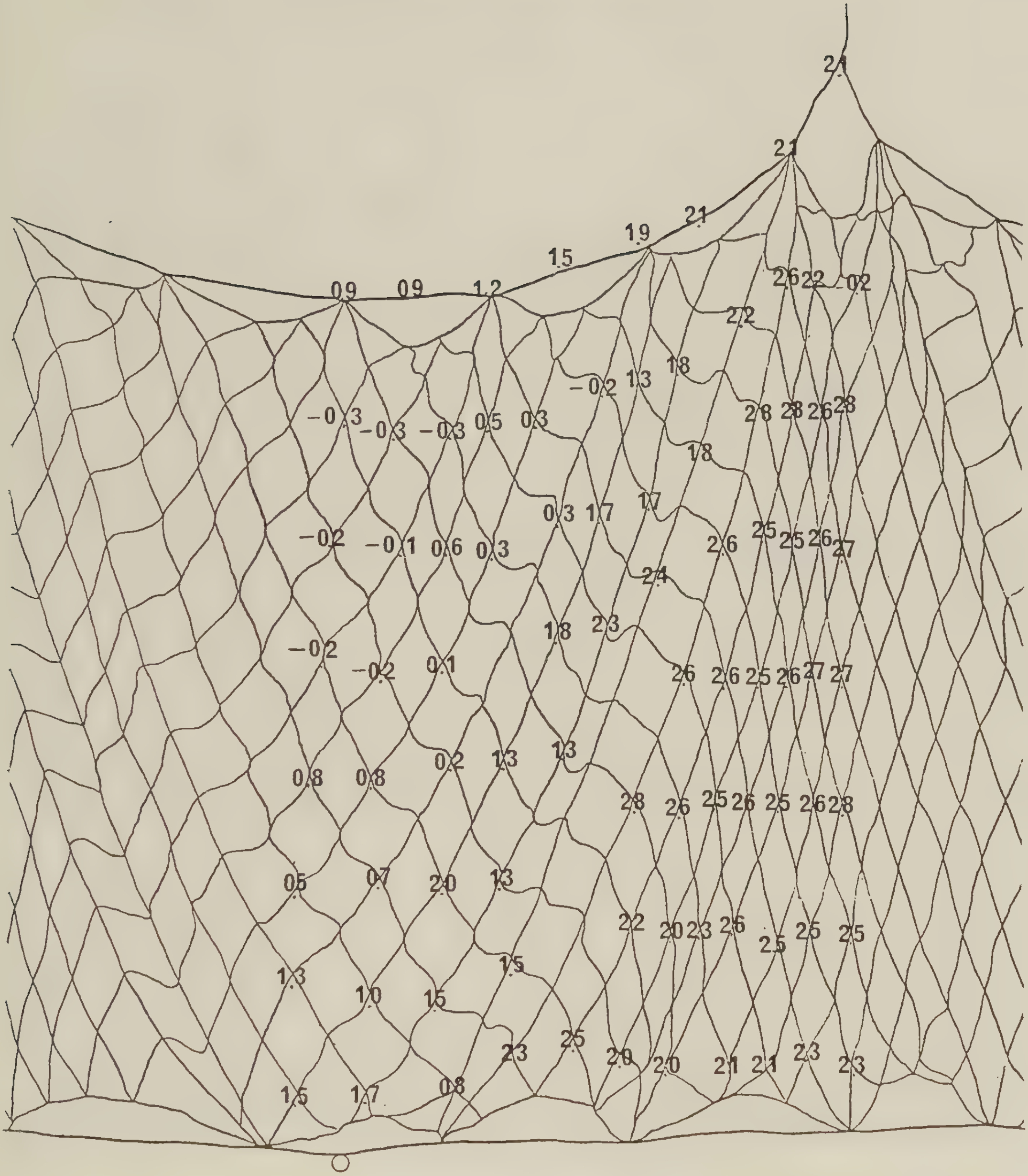

2.1
2.1
2.1
1.9
1.5
0.9
0.9
1.2
2.6
2.2
-0.2
2.2
1.8
-0.2
1.3
-0.3
-0.3
-0.3
0.5
0.3
2.8
2.8
2.6
2.8
1.8
0.3
1.7
1.7
-0.2
-0.1
0.6
0.3
2.6
2.5
2.5
2.6
2.7
2.4
1.8
2.3
-0.2
-0.2
0.1
2.6
2.6
2.5
2.6
2.7
2.7
0.2
1.3
1.3
0.8
0.8
2.8
2.6
2.5
2.6
2.5
2.6
2.8
0.5
0.7
2.0
1.3
2.2
2.0
2.3
2.6
2.5
2.5
2.5
1.5
1.3
1.0
1.5
2.5
2.3
2.0
2.0
2.1
2.1
2.3
2.3
1.5
1.7
0.8

図 26　商業網模型の予備浮力 (g) の分布

Fig. 26. Distribution of spare buoyancy obtained by Fig. 25

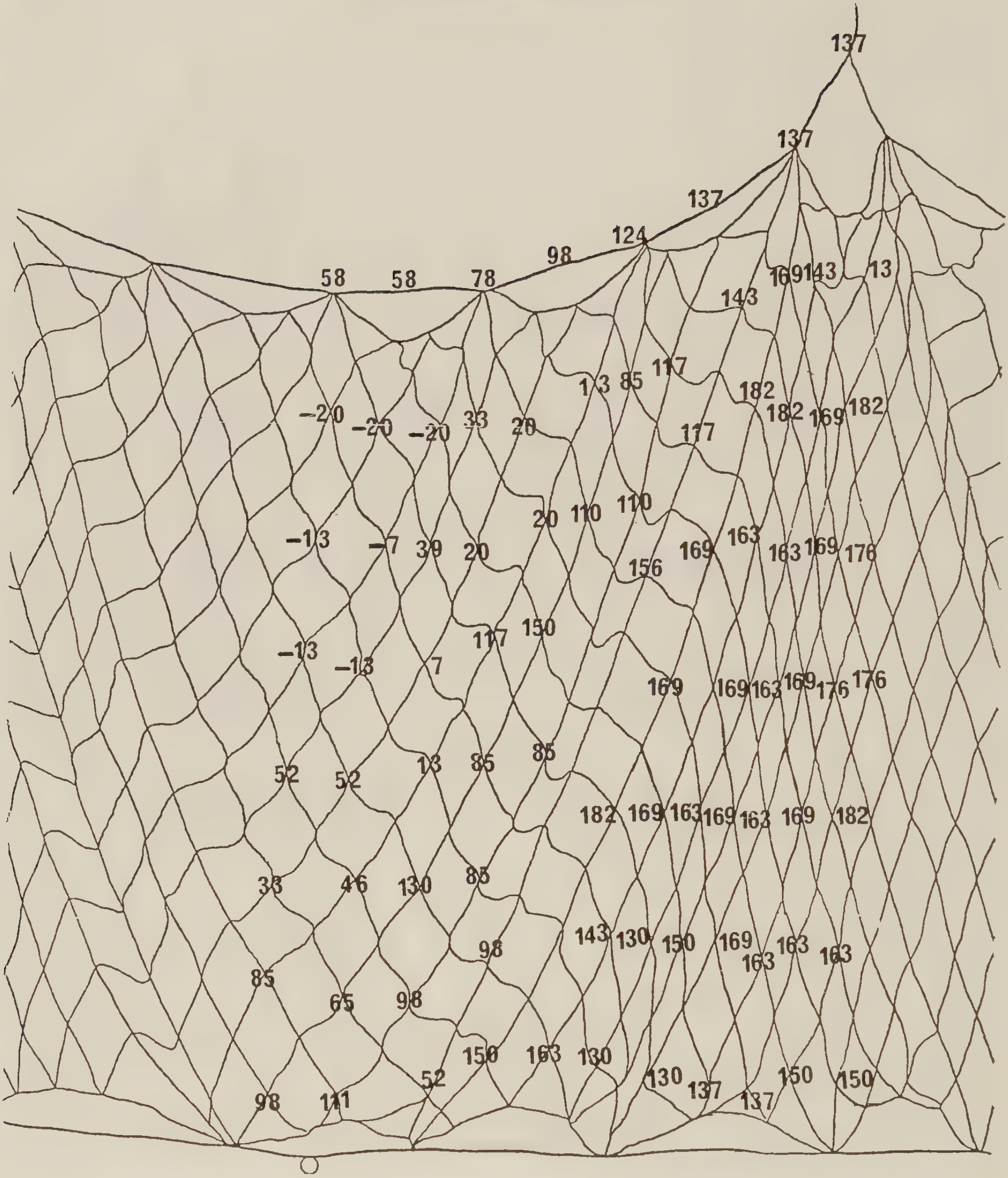

137
137
137
124
98
58
58
78
169
143
13
143
13
85
117
182
182
169
182
-20
-20
-20
33
20
117
20
110
110
169
163
163
169
176
-13
-7
39
20
156
150
117
-13
-13
7
169
169
163
169
176
176
52
52
13
85
85
182
169
163
169
163
169
182
33
46
130
85
143
130
150
169
163
163
163
98
85
65
98
150
163
130
52
130
137
137
150
150
98
111

図 27 カニ刺網の予備浮力 (g) の分布

Fig. 27. Distribution of spare buoyancy (*g*) on king crab tangle nets

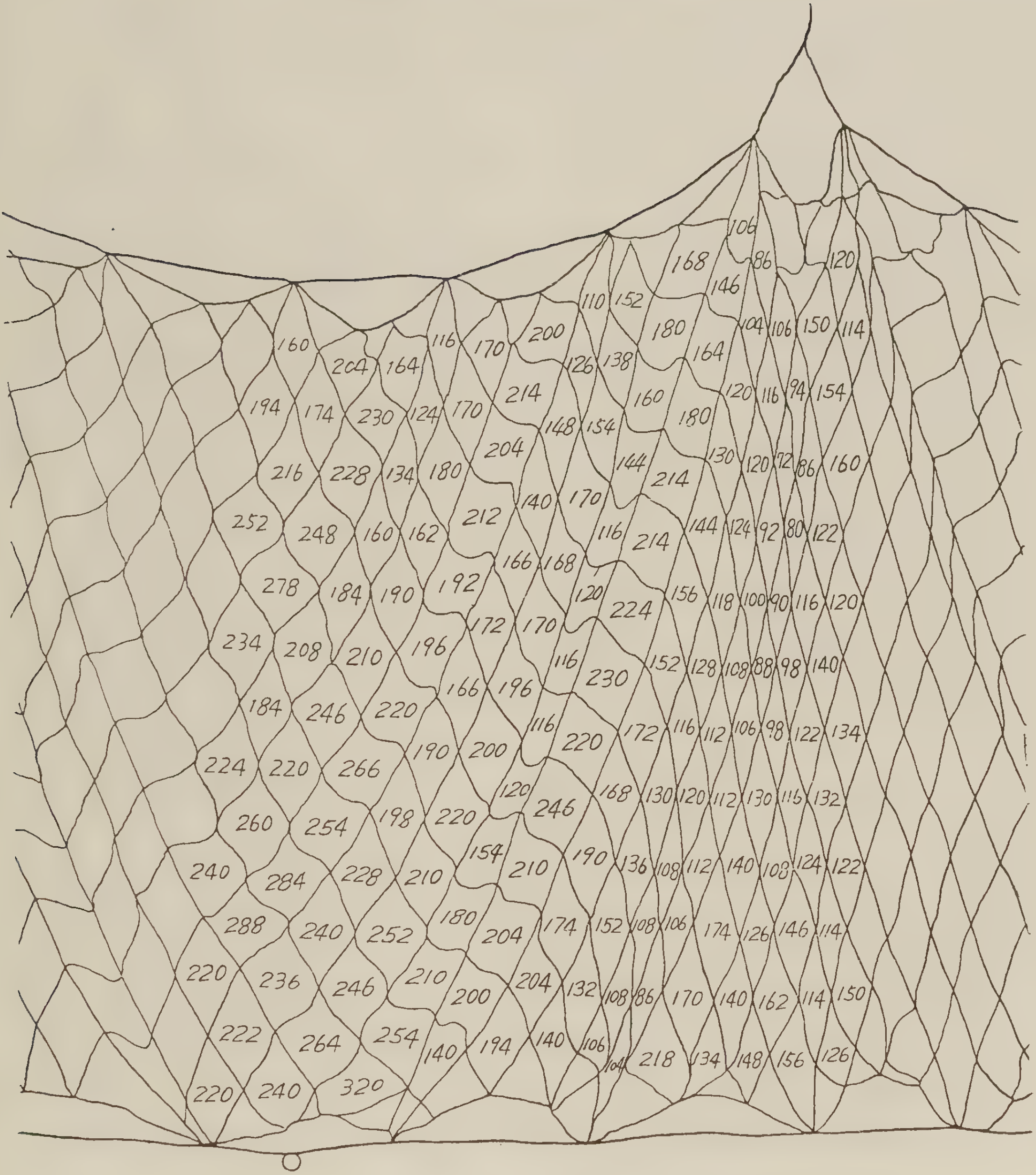

106
168 86 120
146
110 152
180 104 106 150 114
160 204 164 116 170 200
126 138 164
194 174 230 124 170 214 120 116 94 154
148 154 160 180
216 228 134 180 204
144 214 130 120 72 86 160
252 248 160 162 212 140 170
116 214 144 124 92 80 122
278 184 190 192 166 168
120 224 156 118 100 90 116 120
234 208 210 196 172 170
116 230 152 128 108 88 98 140
184 246 220 166 196
224 220 266 190 200 116 220 172 116 112 106 98 122 134
120 246 168 130 120 112 130 116 132
260 254 198 220
240 284 228 210 154 210 190 136 108 112 140 108 124 122
288 240 252 180 204 174 152 108 106 174 126 146 114
220 236 246 210 200 204 132 108 86 170 140 162 114 150
222 264 254 140 194 140 106 104 218 134 148 156 126
220 240 320

図 28 カニ刺網の網目幅 (mm) の分布

Fig. 28. Distribution of the maximum width (mm) of mesh on king crab tangle nets

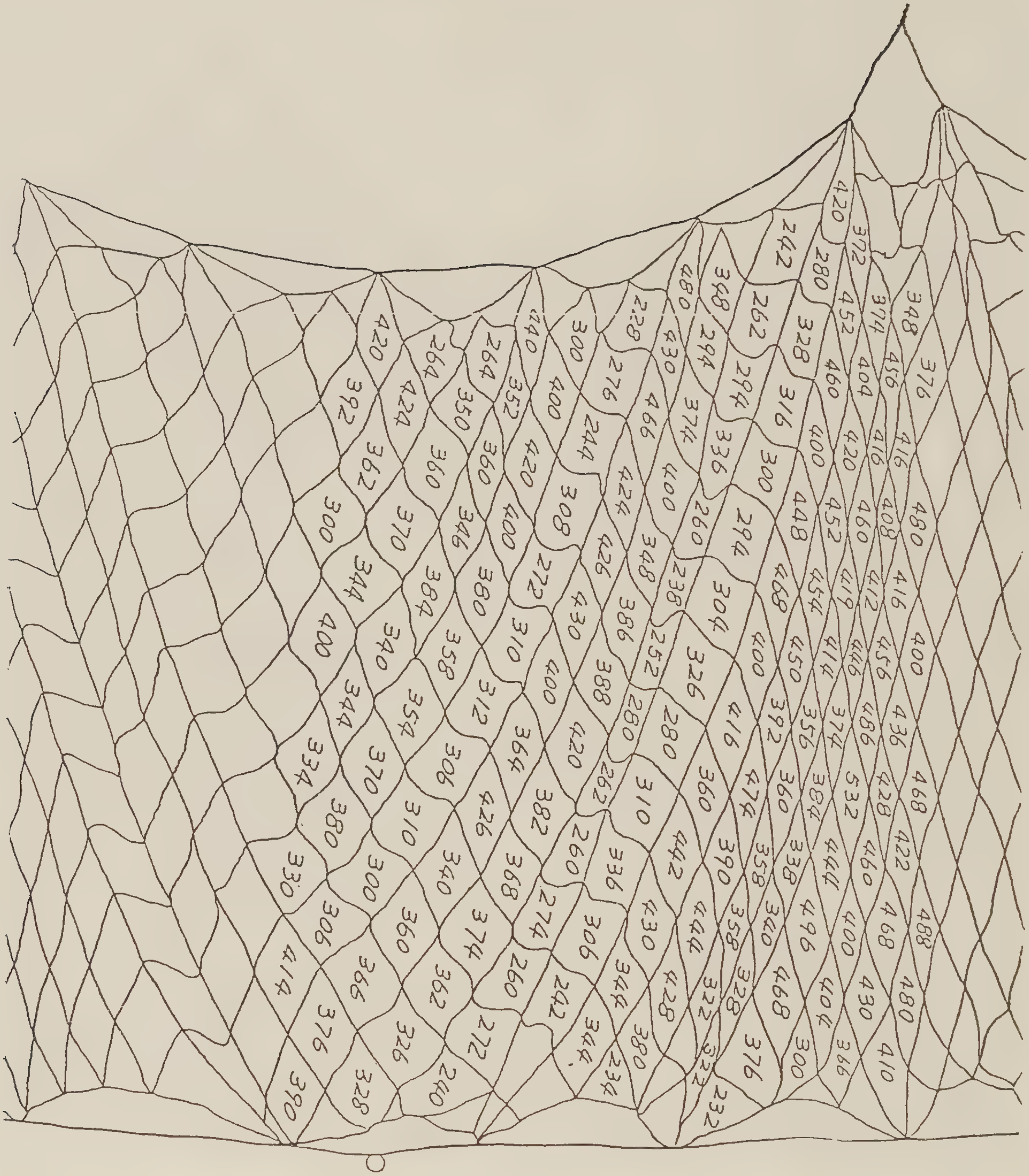

420
392
264
424
264
440
350
352
300
400
228
276
480
430
348
294
242
262
280
420
372
452
374
348
328
294
466
374
460
404
456
376
316
336
362
360
360
420
244
300
400
420
416
416
424
400
308
300
370
346
400
448
452
460
408
480
260
294
348
426
272
380
384
344
238
468
454
419
412
416
304
430
386
310
358
340
400
252
400
414
446
456
400
400
326
450
388
312
354
344
280
392
356
374
486
436
280
416
364
420
306
370
334
262
360
474
360
384
532
428
468
382
426
310
310
380
442
390
358
338
444
460
422
260
340
300
336
368
330
430
444
358
340
496
400
468
488
274
374
360
306
306
428
328
468
404
430
480
344
260
362
366
414
322
376
300
386
410
242
344
380
232
376
272
326
390
328
240
234
322

図 29 カニ刺網の網目長（mm）の分布

Fig. 29. Distribution of the maximum depth (mm) of mesh on king crab tangle nets

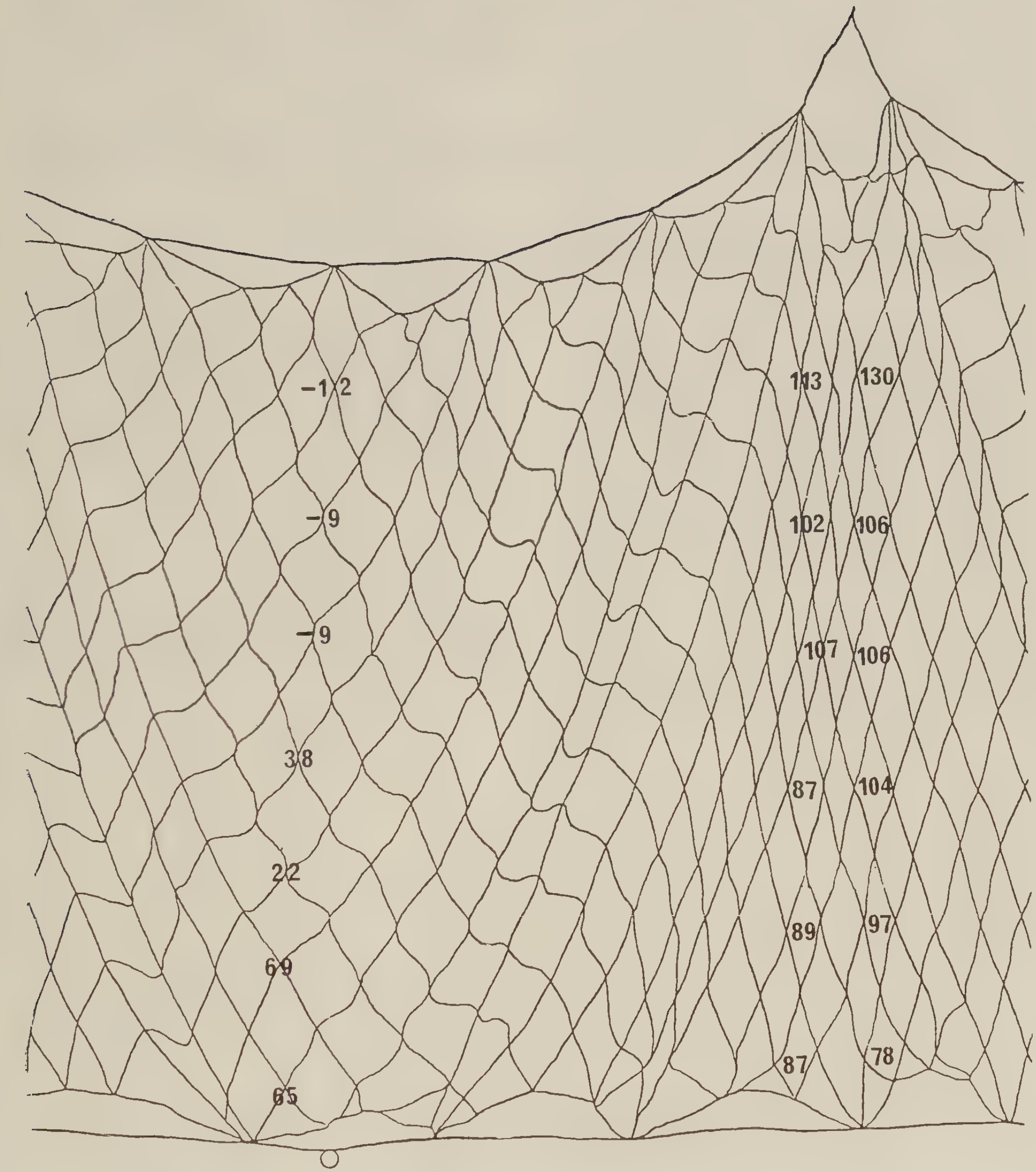

−12
−9
−9
38
22
69
65
113
130
102
106
107
106
87
104
89
97
87
78

図 30　カニ刺網の網目の脚張力 (*g*)

Fig. 30. Tension (*g*) in bars of meshes on king crab tangle nets

29) および脚長 (50 cm) から（９）式によって算出した浮子下および浮子中間部の脚張力を図30に示す。

脚張力は浮子下で大きく，78 g から 130 g の範囲にある。浮子中間部の脚張力は−12 g から69 g までの範囲にあって網地がたるむ上層で小さいが，網目に若干の歪みがみられる浮子中間部では計算値にそれだけの誤差も含む。

タラバガニが海底に張り立った網地に遭遇した当初にてん絡する可能性のある網地下層の脚の張力は多くても 97 g であり，浮子下と浮子中間部との差は小さくなっている。

脚の張力は測定してないが，結節直上の２脚に等分の張力が作用している浮子下および浮子中間部を除いた，浮子中間域の網地では，結節で交叉する左右斜降糸の上方支点の高さおよび浮子綱予備浮力の不同により，浮子の左側域では結節直上の右脚がより緊張し，逆に浮子の右側域では結節直上の左脚がより緊張する。そして，それが結節直上の左右両脚の傾斜に差をもたらし，網目の形状を歪めている。

4.　総　　括

本論文は前半でカニ刺網の構造と漁獲性能との関係の把握および漁獲性能の解析上一考を要する課題とされていたカニ刺網の予備浮力の分布とそれに関連した物理的諸側面の明確化に努めたが，後半では研究の焦点をカニ刺網の構造の変化が漁獲性能を変える要素の究明においた。

カニ刺網の漁獲尾数Nは近似的に網の漁獲能力K'，網地面積S''，タラバガニの存在密度ρとその平均移動速度 $V\sin\alpha$（αは網とタラバガニの移動方向とがなす鋭角）および留網期間の積である。

$$N=K'S''t(\rho\ V\ \sin\alpha)$$

漁獲尾数はタラバガニの離合集散，移動滞留（$\rho\ V\sin\alpha$）を始め諸条件によって種々に規制されているが，本章では研究対象をカニ刺網の漁獲能力K'に限定し，目合，縮結，浮子結着数あるいは網糸の太さが異なる試験網の漁獲試験結果について網の物理的性能，タラバガニの生物学的特性およびそれらの環境などの諸側面から検討した。

4.1　脚数と漁獲能力との関係

カニ刺網の漁獲能力は目合の縮小あるいは縮結の増加に伴い著しく高まることは既述の実験結果に示した。この場合，表14に示すように，脚数の増加，網地の水中重量の増加と予備浮力の減少および網目の幅と長さの伸縮

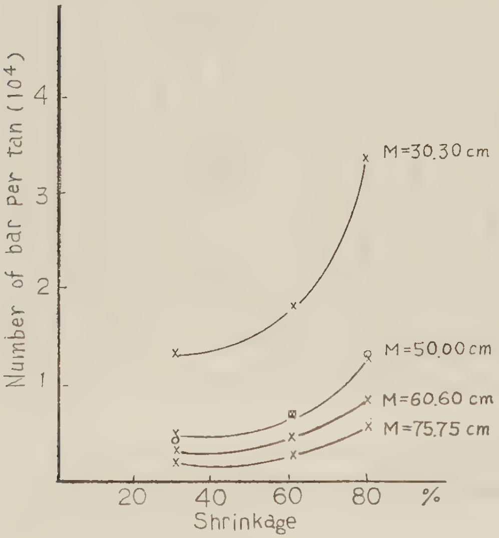


図 31　反当脚数と縮結との関係

Fig. 31. Relation between shrinkage and number of bar per tan
○ : Actual plot
× : Plot calculated using the standerdized tan (4728 cm in length and 321 cm in depth)

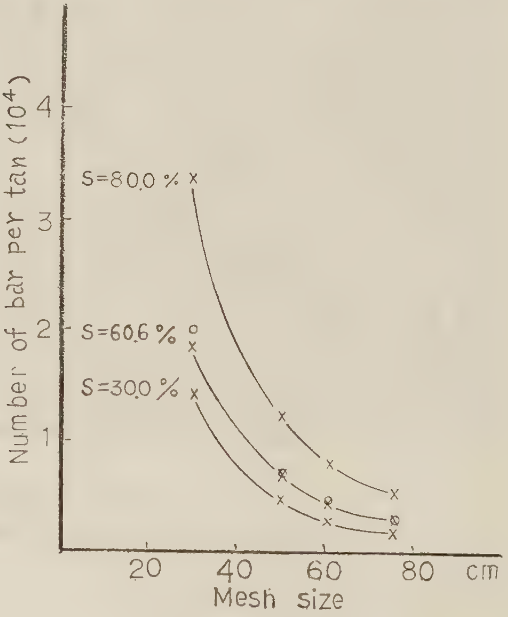


図 32　反当脚数と目合との関係

Fig. 32. Relation between mesh size and number of bar per tan
○ : Actual plot
× : Plot calculated using the standerdized tan

表 14　試験網1反の物理的条件

Taebl 14 Physical conditions of experimental nets by the tan

Experimental net	Mesh			Netting			Buoyancy	Spare buoyancy	Surplus weight	Spare buoyancy of a float
	Numbers	Depth	Width	Height	Length	Weight in water				
		cm	cm	cm	cm	g	g	g	g	g
Commercial net	3,360	46.0	19.7	321	4,728	328	2,100	1,642	3,058	137
1 shaku mesh net	10,296	27.9	11.9	362	4,728	564	2,100	1,406	3,294	117
2 shaku mesh net	2,376	55.7	23.9	334	4,728	295	2,100	1,675	3,025	140
2.5 shaku mesh net	1,580	69.6	30.0	348	4,716	244	2,100	1,724	2,974	144
30% shrink. net	1,890	35.7	35.0	250	4,725	185	2,100	1,785	2,915	149
80% shrink. net	6,608	49.0	10.0	342	4,720	648	2,100	1,322	3,378	110
6 floats net	3,360	46.0	19.7	321	4,728	328	1,050	592	4,108	99
18 floats net	3,360	46.0	19.7	321	4,728	328	3,150	2,692	2,008	150
Thick twine net	3,360	46.0	19.7	321	4 728	1,065	2,100	905	3,795	75
Russian net	2,730	44.7	22.3	291	4,694	865	2,100	1,105	3,595	92

1) Underwater weights, except that of netting, are 45 g in poach line, 85 g in float line, 700 g in sinker line, 4,000 g in sinkers and 4,830 g in all of them.

2) Spare buoyancy equals buoyancy minus underwater weights of nettng, float line and poach line, and spare buoyancy of a float is the spare buoyancy divided by number of float of a tan.

3) Surplus weight equals weight of net minus float buoyancy, in water.

（図15）など一連の物理的特性の変化も惹起している。先ず，これらの物理的条件の変化の夫々について漁獲能力を変える可能性を検討し，漁獲能力を変えたカニ刺網の要素を明確にする。

4.1.1　網目幅

目合の縮小あるいは縮結の増加にともなって反当罹網尾数が著しく増加し，網目幅が縮小する。この様な漁獲能力の増加が網目幅の縮小によって小型のタラバガニをより多く獲ることに因って起るものでないことは，第2章で述べたように，縮結あるいは目合を異にするカニ刺網の間でタラバガニの大きさに対する選択性が変っていないことから明白である。

4.1.2　網地の水中重量と予備浮力

目合が30.3 cmから75.8 cmまで，あるいは縮結が0.303から0.800まで変ることにより1反につき網地の水中重量は185 gから648 gまでの範囲内で増加し，予備浮力は1785 gから1322 gまでの範囲内で減少している。この程度の予備浮力の相異が反当罹網尾数を著しく変える要因とならないことは浮子結着数別漁獲試験で試験網の予備浮力が529 gから1782 gまで相異しているのに，それらの反当罹網尾数の間に有意差が認められなかったことからもうかがえる。また，縮結の多い網ほど予備浮力が小さくなるから罹網したタラバガニの水中体重によって網が海底に伏し易く漁獲能力が減少し易いとする考え方は，図3に示す海中設網時間の増加に伴う反当罹網尾数の増加が縮結が多い網で著しいという実験結果と相反し，反当予備浮力の1,322 gから1,785 gまでの相異はそれほど漁獲能力に影響するものではないことを示していると考えられる。

4.3.1　脚数

反当脚数τと縮結Sあるいは脚長lとの関係は次式によって表される。

$$\tau=\frac{l'\cdot H}{l^2(1-S)\sqrt{S(2-S)}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

ただし，l'は1反の網付長で4,728 cm（商業網），Hは網丈で321 cm（商業網）とする。図31および32に示す

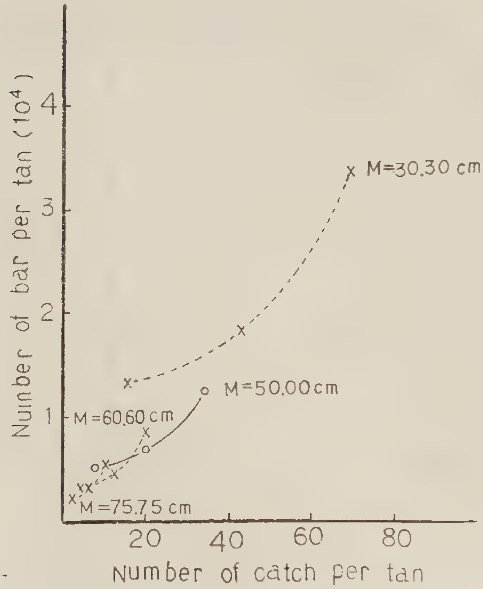


図 33　種々な縮結における反当罹網尾数と反当脚数との関係

Fig. 33. Relation between number of bar per tan and number of catch per tan by the experimental result of various shrinkage nets

○ : Actual plot

× : Calculated plot

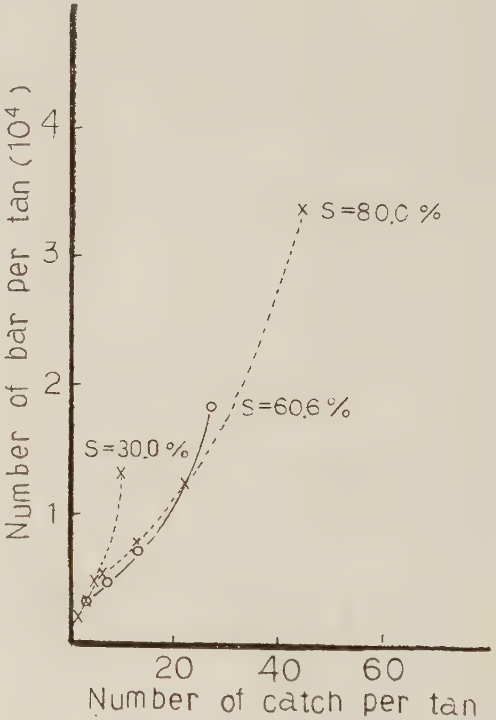


図 34　種々な目合における反当罹網尾数と反当脚数との関係

Fig. 34. Relation between number of bar per tan and number of catch per tan by the experimental result of the nets with various mesh sizes

○ : Actual plot

× : Calculated plot

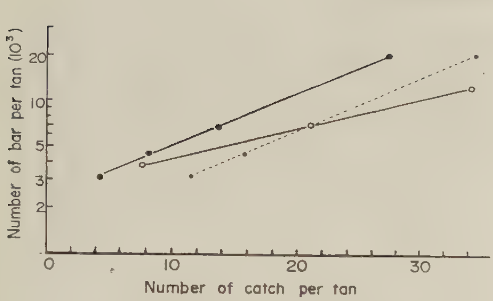


図 35　種々な目合（縮結60%）あるいは縮結（目合50 cm）における反当罹網尾数に対する反当脚数（対数）の回帰

Fig. 35. Regression of the logarithms of number of bar per tan plotted against number of catch per tan by various shrinkages in 50 cm mesh size (∘) or by various meh sizes in 60.6% shrinkage (•)

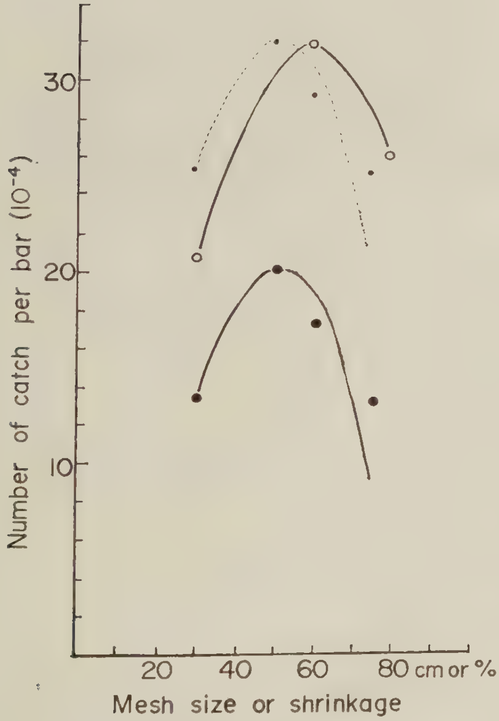


図 36　抛物線による脚当り漁獲能力の図示

Fig. 36. Schematic representation of the fishing ability per bar with the parabola

● : By mesh sizes in the shrinkage of 60.0%

○ : By shrinkages in the mesh size of 50 cm

反当脚数と縮結あるいは脚長との関係を表す曲線は図1および5に示す反当罹網尾数と縮結あるいは脚長との関係を表す曲線と夫々が類型的で，指数曲線で表される。つまり，目合の伸縮あるいは縮結の多少に伴う漁獲尾数の増減の仕方が脚数の増減の仕方に似ている。

図33および34に示す反当罹網尾数nとτとの関係は指数曲線型である。図35に示すように，nと$\log\tau$との間には直線関係が認められ，次の関係式が求められる。

縮結0.606のカニ刺網の目合を30.3cmから75.8cmまで変えた場合

$$\log\tau=2.366+0.0350n \cdots\cdots (11)$$

$$n=\frac{\log\tau-2.366}{0.0350} \cdots\cdots (12)$$

目合50.0cmのカニ刺網の縮結を0.303から0.800まで変えた場合

$$\log\tau=2.401+0.0209n \cdots\cdots (13)$$

$$n=\frac{\log\tau-2.401}{0.0209} \cdots\cdots (14)$$

図35における両回帰直線の座標軸に対する傾角の差あるいは(11)～(14)式から，脚数の変化に伴う漁獲尾数の増減は目合を伸縮するよりは縮結を増減した場合に著しいことが判る。

A網（目合50 cm，縮結60.6%）は目合別および縮結別の両漁獲試験で共通に使用されている。両試験におけるA網の漁獲尾数の違いは日時，場合による違いである。目合別漁獲試験の回帰直線を，そのA網の点から縮結別漁獲試験の同点まで平行移動した回帰直線が図35に点線で示されている。こうすると6種の網を同時に試験したのと同じ意味になり，それにより傾向比較をすると，両回帰直線は反当脚数6,720本（目合50 cm，縮結60.6%）で交叉し，その付近を境に，反当脚数がそれ以上の場合には目合の縮小より，縮結が増加した場合に漁獲尾数の増加が著しく，逆に反当脚数がそれ以下では目合の伸長より縮結の減少による場合に漁獲尾数の減少が著しい。

更に脚当り漁獲尾数n/τと目合あるいは縮結との関係は図36に示す2次曲線型であり，次の実験式で表わされる。

縮結0.606のカニ刺網の目合が30.3cmから75.8cmまでの範囲で変った場合

$$\frac{n}{\tau}=-0.0182M^2+1.18M+15.7(10^{-4}) \cdots\cdots (15)$$

目合50.0cmのカニ刺網の縮結が0.303から0.800までの範囲で変化した場合

$$\frac{n}{\tau}=-1.33S^2+16.0S-16.2(10^{-4}) \cdots\cdots (16)$$

36図でも35図と同じ方法で2次曲線を平行移動させ，それを点線で示す。両曲線を比較すると，両者の差違は僅少であり，$M=50$，$S=60$の近辺に両者を含めたn/τの最高値があると考えられる。この縮結と目合は商業網のそれらと一致し，それらの反当脚数は共に6,720本である（表14，図37および38）。図37および38に脚当り漁獲尾数と反当脚数との関係を示す。脚当り漁獲尾数は反当脚数6,720本位までは増加し，反当脚数が6,720本を超えると漸減してゆく。なお，実測値と試算値とのずれは試験網1反の面積と標準化した1反の面積との相異に因る。また，n/τが小さい値となったのは罹網していない網目の脚もτとして算入していることに因る。

ここで重要なことは，漁獲機構の解明という観点あるは網地を有効に利用するという観点からも，縮結を変えた場合あるいは目合を変えた場合もともに，反当脚数が6,720本で漁獲尾数が増加から漸減に転ずる点にある。

脚の漁獲能力が反当脚数6,720本前後で最大に達する要因を明らかにするにはタラバガニの対網生態および歩行体型における幅γ，高さλ，網目幅の½ A'，網目長の½ C'が明らかでなければならない。それらの観察結果，実験式および理論式は第二章の第3節に示した通りである。

直立したカニ刺網へタラバガニが遭遇した時に絡まる可能性のある網目の脚数τ'は次の不等式をみたす最小の整数YとZとの積で表される。

$$Y=\frac{\gamma}{A'}=\frac{\gamma}{l(1-S)}\cdots\cdots(17)$$

$$Z=\frac{\lambda}{C'}=\frac{\lambda}{l\sqrt{S(2-S)}}\cdots\cdots(18)$$

$$\tau'=Y\cdot Z\cdots\cdots(19)$$

ただし，lはcmで示した脚長である。

図39はγとλとの関係およびA'とC'との関係を図示したもので次式に従う。

$\gamma=1.3\lambda+7.5$

$\lambda=0.80\gamma-6.0$

縮結0.606の網の脚長が変化した場合

$A'=0.44C'$

$C'=2.3A'$

脚長25.0 cmの網の縮結が変化した場合

$A'=\sqrt{25^2-C'^2}$

$C'=\sqrt{25^2-A'^2}$

従って，図39あるいは上記の関係式から次のような不等式をみたす最小の整数YおよびZが導かれる。

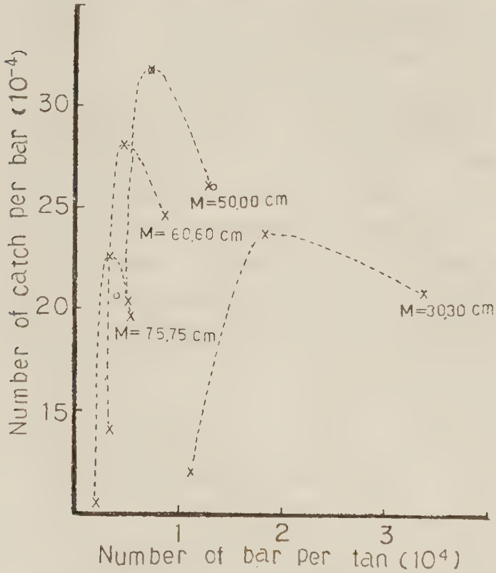


図 37　縮結30～80％における反当脚数による脚当り漁獲能力の変化

Fig. 37. Variation of fihing ability per bar with number of bar per tan by shrinkages (30-80％)
○：Actual plot
×：Calculated plot

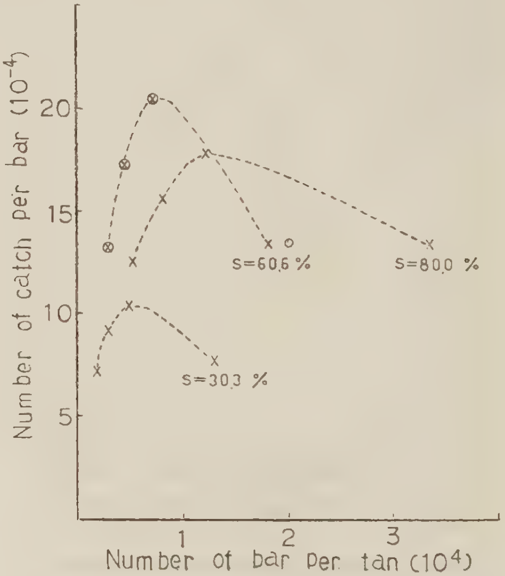


図 38　目合30.30～75.75 cmにおける反当脚数による漁獲能力の変化

Fig. 38. Variation of fishing ability per bar with number of bar per tan by mesh sizes (30.30～75.75 cm)
○：Actual plot
×：Calculated plot

海底に直立した縮結0.606の網の脚長が変った場合

$$Y>\frac{\gamma}{A'}=\frac{\gamma}{l(1-S)}=\frac{2.7c+1.7}{0.39l}=\frac{1.3\lambda+7.5}{0.44C'}$$

$$Z>\frac{\lambda}{C'}=\frac{\lambda}{l\sqrt{S(2-S)}}=\frac{2.0c-6.0}{0.92l}=\frac{0.80\gamma-6.0}{2.3A'}$$

海底に直立した脚長25.0cmの網の縮結が変った場合

$$Y>\frac{\gamma}{A'}=\frac{\gamma}{l(1-S)}=\frac{2.7c+1.7}{25(1-S)}=\frac{1.3\lambda+7.5}{\sqrt{25^2-C'^2}}$$

$$Z>\frac{\lambda}{C'}=\frac{\lambda}{l\sqrt{S(2-S)}}=\frac{2.0c-6.0}{25\sqrt{S(2-S)}}=\frac{0.80\gamma-6.0}{\sqrt{25^2-A'^2}}$$

ただし，網地下層の海底に対する平均傾斜がθ度である場合のZは

$$Z>\frac{\lambda}{C\ \sin\theta}$$

として近似値を算出する。

カニ刺網に遭遇した甲幅6.0cm以上のタラバガニが絡まる可能性が強い網目の脚数τ'と脚の漁獲能力n/τとの関係は，上述の関係式による計算値τ'，反当脚数τとn/τとの関係を示す図37，38およびタラバガニの形態と対網生態（第2章　第3節）から，次のように想定される。

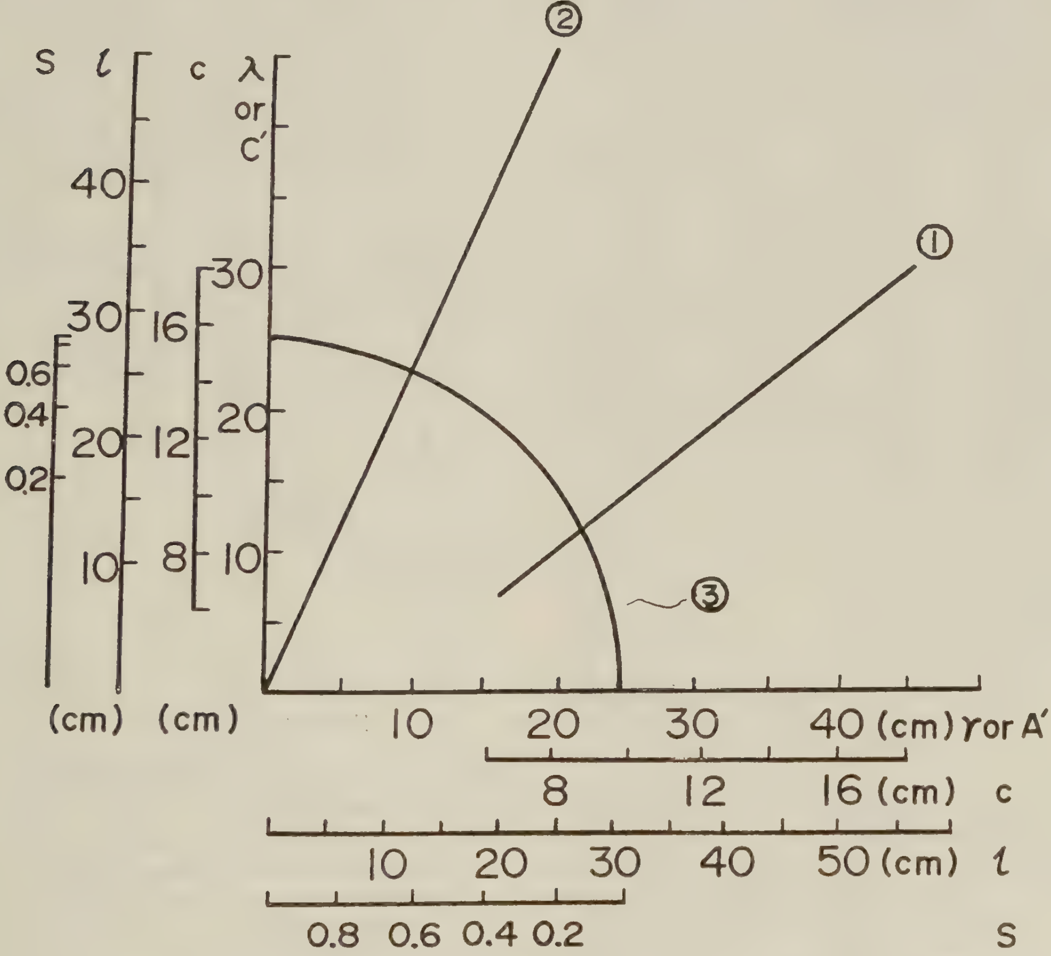


図 39　(1) タラバガニが直立した刺網に接触する幅γと高さλとの関係
(2) 縮結60.6％，脚長lにおける網目幅の1/2A'と網目長の1/2C'との関係
(3) 脚長25cm，縮結Sにおける網目幅の1/2と網目長の1/2との関係

Fig. 39. (1) Relation between touchable height λ and width γ of a king crab with tangle net set perpendicularly up
(2) Relation between half of mesh width A′ and half of mesh depth C' by lengths of bar l in the shrinkage of 60.6 %
(3) Relation betwen half of mesh width and half of mesh depth by shrinkages S in the length of bar of 25 cm

表 15 タラバガニに接触する網糸の脚数および脚当り漁獲尾数（10^5）

Table 15 Number of catch per bar (10^{-5}) and number of bar which touches to a king crab encountered the net set up, by carapace widths

Experimental net	Catch per bar	No of bar by caapace widths		
		6 cm	13 cm	20 cm
1 shaku mesh net	134	3	12	24
Commercial net	202	2	4	10
2 shaku mesh net	173	2	3	8
2.5 shaku mesh net	133	1	3	3
30 % shrink. net	206	1	4	6
Commercial net	317	2	4	10
80 % shrink. net	260	3	8	18

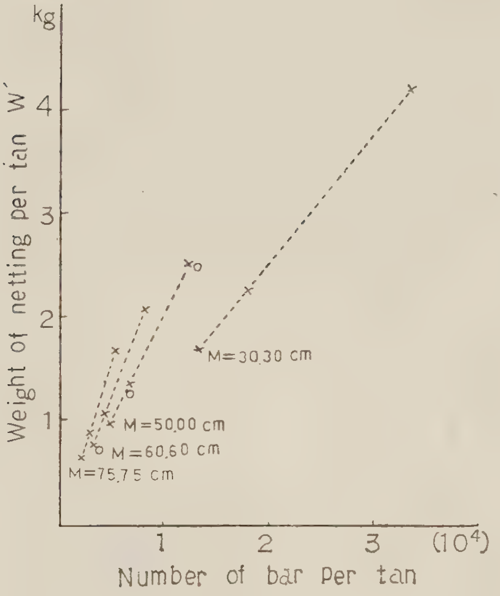


図 40 縮結 30〜80 % における 反当網地重量と反当脚数との関係

Fig. 40. Relation between number of bar per tan and weight of netting per tan in various shrinkages (30–80 %)
• : Actual plot
× : Calculated plot

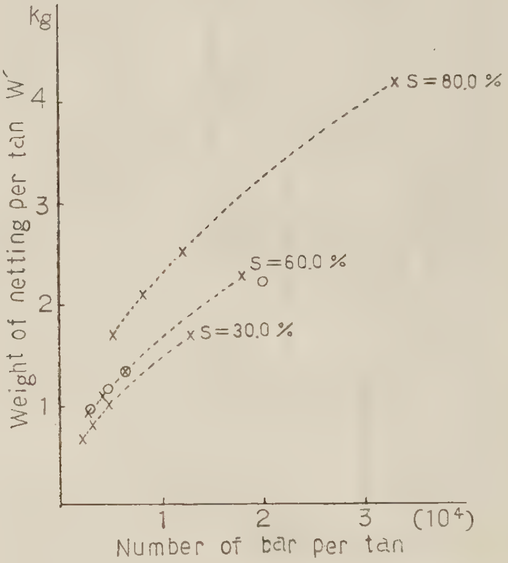


図 41 目合 30.30〜75.75 cm における反当網地重量と反当脚数との関係

Fig. 41. Relation between number of bar par tan and weight of netting per tan in various mesh sizes (30.30〜75.75 cm)
• : Actual plot
× : Calculated plot

(i) タラバガニへの接触が1脚のみでは，タラバガニが網地にてん絡する以前に離脱し易いために脚当り漁獲能力は非常に小さい。

(ii) タラバガニへの接触が2脚以上へと増加するに伴い，タラバガニは著しく網にてん絡し易くなり，タラバガニに対する保持能力が増大するので，脚当り漁獲能力が著しく高まる。

(iii) 反当脚数が 6,720 本位で脚当り漁獲能力は最大に達する。この網にタラバガニが遭遇した際に接触する脚数と脚当り漁獲能力を示す表15によれば，タラバガニに接触する脚数は商業網の場合，甲幅6.0〜20.0 cmのタラバガニに対し2〜10本であり，漁獲平均甲幅(13.0 cm)の場合には4本である。

(iv) タラバガニへの接触脚数が一定数以上になると接触脚数の増加によって網の漁獲能力が高まっても，その上昇率は次第に低下してゆくから，脚当り漁獲能力は(ii)における増加から(iv)では漸減に転ずる。

(v) 「究極的にはタラバガニへの接触脚数の増加による網の漁獲能力の変化は零から負へ変化するので，脚当り漁獲能力も更に低下を続ける。

次に所要網地量当り漁獲量を検討する。縮結の増加あるいは脚長の縮小によって，反当脚数 τ が(10)式に従い増加し，反当網地量 W′ は次式に従い増加する。

$$W' = K\tau wl \quad \cdots\cdots(11)$$

ただし，l は cm で示す脚長。w は網糸の長さ 1 cmの乾燥重量で，ビニロン3撚21本の場合 $w=3.56\times10^{-4}\times21$ で算出され，更に樹脂加工しているので約10%増重する。K は結節の係数で，目合の大きいカニ刺網では $K\fallingdotseq 1$ である。

従って，図40および41に示すように，縮結を増した場合，反当網地重量は反当脚数の増加に伴い直線的に増加し，目合を縮小した場合には，反当脚数の増加による反当網地重量の増加率は次第に低下する。

図42および43の反当網地重量と単位網地重量当り漁獲尾数との関係は，縮結を増した場合，単位網地重量当り漁獲尾数は，反当脚数と脚当り漁獲尾数との関係同様，縮結60.6％，反当網地重量 1,280 g 位で極大に達し，急増から漸減に転ずる。しかし，目合を縮小した場合，単位網地重量当り漁獲尾数は反当網地重量の増加により，増加率は次第に低下するが，反当網地重量 2,200 g，目合 30.30 cm（実験範囲）までは増加を持続する。

従って，資源保護のため永年に亘りカニ刺網の目合は 50 cm に規制されてきたが，網地資材の有効利用上からは目合の縮小が望ましい。また，既述のように，カニ刺網は目合が 30.3 cm から 75.8 cm まで，あるいは縮結が 30.0％から80.0％まで変ってもタラバガニ(甲幅 60 cm 以上）に対する選択性は相異しないから，タラバガニ資源の生物生産性を有効に利用する観点からも目合の縮小には問題がない。

4.2 予備浮力と漁獲能力との関係

海底におけるカニ刺網の網成りを，加藤[10]は浮子の結着数が6個から13個まで相異した場合について観察し，葉室[12]も浮子結着数を種々に変えた場合について網高さ計および網深さ計で計測，解析し，笹川[41]は 1/4 模型網の予備浮力の分布型と網成りから論じている。上記3編の論文の他にタラバガニとその漁場環境に関する諸報告[20~29]を総合するとカニ刺網の予備浮力と網成りおよ

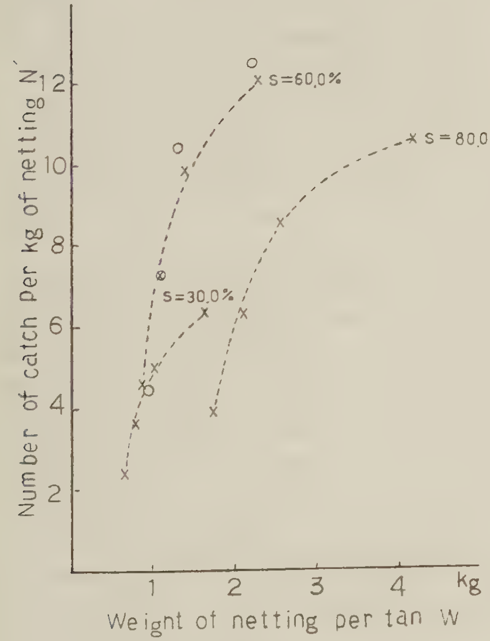


図 42 目合による単位網地量当り漁獲量の変化

Fig. 42. Variation of catch per unit amount of netting with mesh size
○ : Actual plot
× : Calculated plot

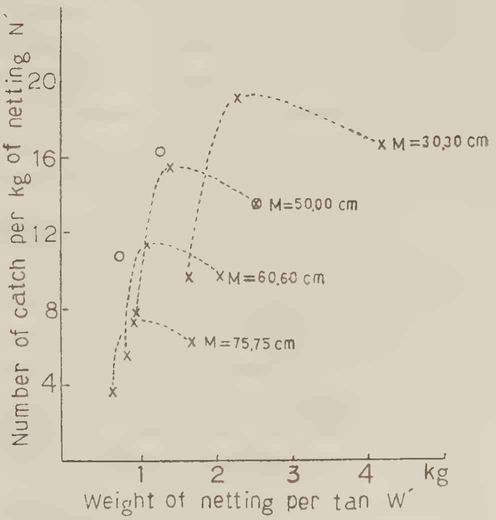


図 43 縮結による単位網地量当り漁獲量の変化

Fig. 43. Variation of catch per unit amount of netting with shrinkage
○ : Actual plot
× : Calculated plot

び漁獲性能との関係は次のように想定される。

海底に張られているカニ刺網において，予備浮力は網地の張りとてん絡性を支配し，予備浮力の分布がその部分的変動を規制する。また，予備浮力の強さとその分布はトンネルと俗称される沈子間沈子綱の離底および流水抵抗による網の傾きの程度を左右する要素である。これら予備浮力に関連したカニ刺網の物理的条件にタラバガニの生物的条件および環境条件が加わって漁獲性能が決まる。

上述の仮設に含まれる諸側面について，予備浮力を強めた場合およびそれを弱めた場合にどのような現象が生じ，それが漁獲性能にどのようにして影響するのか具体的に考察をすすめる。

(i)　予備浮力を強めた場合

投網後着底するまでの間に沈子着底間隔は沈子結着間隔より短縮する。一方，既述のように浮子の浮力は浮子下に集中するから，浮子が沈子結着点上に位置しない限り，そこでは浮子の浮力が網の水中重量を超え，沈子綱が多少浮揚，離底することがある。その浮揚の程度は沈子結着間隔に対する沈子着底間隔の縮小率と予備浮力の大きさにより決まる。潜水観察[10]によれば，1反に13個の浮子（浮力175gのガラス玉）を結着した場合，沈子結着点の中間部で網地下端の離底距離は15.0～90.0cmで，沈子綱と目通糸との間隙も最大幅で15.0cmに達するとされている。当然，沈子結着部付辺以外の浮子下では設網当初，タラバガニは網に罹ることなく設網線を通過することがあると考えられるが，浮子下以外の網裾の着底部から始まるタラバガニの罹網によって網地が繰り下げられ，順次罹網するタラバガニの水中体重により沈子綱の離底部が無くなることが望ましい。葉室[12]は浮子の浮力および配置とタラバガニの水中体重との関係について次のように論じている。〝今若しカニの水中重量と網（てん絡部分）の水中重量の和より浮力が上まわっていればカニが罹網した後もカニと共に網を垂直に立たせる恰好となる。カニの肢を上方または横方向に伸して体をてん絡させた場合最初は海底に接した部分の網目に刺ったものも，てん絡状況によっては余剰浮力のためカニを中吊りの状態にするであろう。その場合その縦方向の網面積に対しては次の罹網は不可能となる。若しこの状態で満足するものとすればそれより上の網地は最初から不用なものといわねばならない。然らば罹網後少くともその点より上の網地を次の罹網に利用するためにはカニの水中重量によって浮力が負けてん絡した部分はカニと共に海底に沈着しなければならない。試験に供した網（綿糸およびクレモナ）は1目（横）×7目（縦）の浮子綱および目通糸を含めた水中重量は4.2gおよび2.6gである。カニがある点に罹ってその部分が沈むためにはカニの水中重量とその時のてん絡網地の縦目数と横目数が関係する。

1目当りの浮力をy(g)，てん絡網地の縦目数をa，てん絡網地の横目数をbおよびカニの水中重量をW(g)とすると，1目当りの水中重量（g）は浮子綱が0.4，目通糸が0.1，網地が2.06および1.87であるから

$$\mathrm{by}>\frac{1.87b}{7-a}+0.4\mathrm{c}+0.1b+W \cdots\cdots\cdots \text{綿糸網の場合}$$

$$by<\frac{1.87b}{7-a}+0.4b+0.1b+W \cdots \text{クレモナ網の場合}$$

実際の罹網状況は$a=3$, $b=3$程度でありカニの水中重量$W=300$g（西カム），$W=5000$g（ブリストル）であるから

$3y<(5.61/4)+1.5+300$

$y<101\mathrm{g}$ ……………………西カムで綿糸網の場合

$3y<(6.18/4)+1.5+300$

$y<101\mathrm{g}$ ………………西カム，クレモナ網の場合

$3y<(5.61/4)+1.5+500$

$y<168\mathrm{g}$ ………………ブリストルで綿糸網の場合

$3y<(6.18/4)+1.5+500$

$y<168\mathrm{g}$ …………ブリストルでクレモナ網の場合

現在普通使用されている1目当りの浮力は1.5g（2.8寸玉を27目毎に装着した場合）程度であるから西カム・ブリストル漁場いずれよりも遥かに小さいので充分カニのてん絡後海底にカニは沈む訳である。しかし，この6.5gの浮力は1目当りに換算した浮力であって実際には決して各部に平均して働いていない。とくに浮子間隔が相当広いのでなお更である〟。

カニ刺網の予備浮力分布は図27に示すように，タラバガニが接触する網地下層1.5目では，結節予備浮力が浮子中間部で小さく，52～111g，浮子下から浮子中間域にかけて大きく，130～169gである。図44によれば，雌ガニおよび仔ガニなど甲幅13.0cm以下の小型ガニの水中体重は100g以下で，甲幅170cm以上の大型ガニの水中体重は250g以上に達する。図27および44を参照すると，浮子中間部の結節予備浮力は甲幅11.0～14.0cmのタラバガニの水中体重に相当し，浮子下から浮子中間域までの結節予備浮力は甲幅15.0～16.0cmのタラバガニの水中体重に相当する。浮子中間部では甲幅11.0～14.0cm以下，浮子下から浮子中間域までは甲幅15.0～16.0cm以下のタラバガニの水中体重は結節予備浮力以下であるため，これらのタラバガニに対する網地のてん絡はより大型のタラバガニがてん絡した場合に比べ進行しにくい

と考えられる。

浮子中間部以外の部位では網目幅が狭く（図28），甲幅13.0 cm以上の大型ガニが網地に接触する幅は30.0 cmはを超える（図39）。この場合，接触する結節数は2結節になるが，罹網したタラバガニに作用する浮力は1結節の場合とあまり変らないであろう。

タラバガニの罹網がふえるにつれて，網地下層の予備浮力は減少し，張りが弱まり，タラバガニのてん絡が容易になってゆくと推察される。

予備浮力の増大は網地の張りを強め，タラバガニに対する網地のてん絡を進行しにくくしていると想定されるが，実際に潜水観察した加藤の次の記述と符号する。〝実際に観て一度罹ったカニが案外外れてゆくものの多いのに驚く有様なり。網糸のあまり緊張しすぎていることは反って罹り難い様に思われる[10]〃。

(ii)　予備浮力を弱めた場合

沈子結着点間の沈子綱の離底が減ずるためタラバガニは設網線を通過できない。網地は張りが弱く，絡まり易い。また罹網部位の予備浮力がタラバガニの水中体重より小さくなるとタラバガニの罹網によって上層の網が順次降下してくるので，上層の網地も漁獲に効果的に関与し易くなると考えられる。その反面，浮子結着点間の浮子綱の垂下が増し，潮流による網の傾斜が大きくなる。半ば流れに乗り流れと似た方向へ移動するタラバガニ[24]に対しては網が直立しているより多少傾斜しているほうが罹網し易いであろうが，網は潮流あるいはタラバガニの罹網によって海底に伏し，漁獲能力を失い易くなる。

カニ刺網は網糸の直径の割に目合が大きく，結節の流水抵抗を無視しうるので，網地1反の流水抵抗を次に示す田内[42]の式で試算する。

$$R=a\frac{2\mu}{l}\,\frac{1-\cos^2\varphi\ \cos\ \alpha}{\sin\varphi\cos\varphi}\rho' VS' \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

ただし

$2\mu/l$：網糸の直径／脚長＝0.00476

φ：縮結角＝23°

α：流れと網地面との夾角

a：常数＝1

ρ'：流体密度＝105 kg・sec²/m⁴

V：流速＝m/sec

S'：カニ刺網1反の面積＝145 m²

図45に上式より得た流水抵抗値Rを示す。カニ刺網の許容傾斜θを決めれば，図45から次式により必要な反当予備浮力の近似値が試算される。

$$b=\frac{R}{\tan\theta}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

潮流によるカニ刺網の傾斜はカニ刺網が剛体でないため彎曲し，6割強の縮結が入った網地は潮流に吹かれて

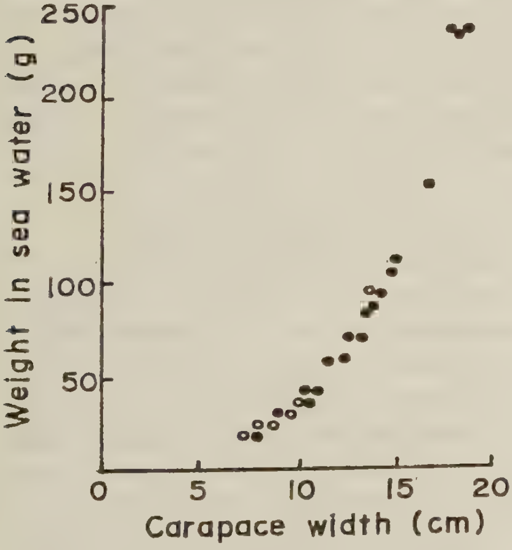


図 44　タラバガニの水中体重と甲幅との関係

Fig. 44. Relation between carapace width and body weight of the king crab in sea water
● : Male
○ : Female

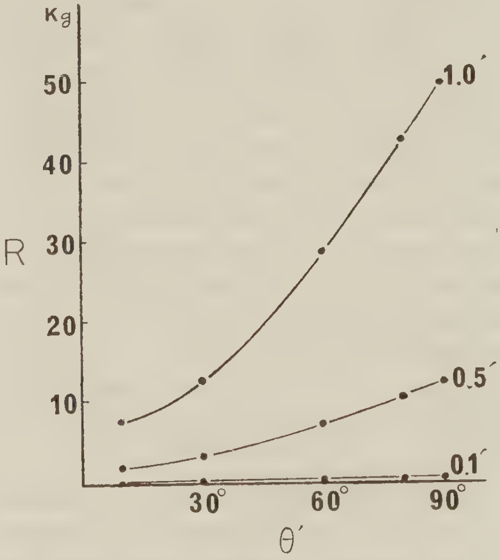


図 45　流れと網地面との夾角θ'と網地1反の流水抵抗の試算値Rとの関係

Fig. 45. The calculated value of hydraulic resistance R of the netting (a tan) in relation to the acute angle θ' between the plane of netting and the direction of current

ふくらみ，予備浮力が一様に分布していないので複雑に彎曲している。網地の傾斜は下層でやや大きく，浮子付近では少さい（図版3）。従って，必要な反当予備浮力は(13)式で求めた試算値より少し大きくなる。

タラバガニ漁場では潮汐流が卓越し，流向不定である。西カムチヤッカ日本側漁場（距岸12浬以遠）での平均流速は0.1ノット位である。最大潮汐流は南北流で，設網線との平均交角は10度内外であるため流水抵抗による網の傾斜は小さく，かつ海底は平担な砂泥海床が広がり，網地が絡まる生物の着生も少ない[23,25]。この様な環境条件では予備浮力の減少はさして問題にならない。カニ刺網の最適傾斜を30度にとれば，図45により上記の漁場では，$R=0.033$ kg となり，この値を(13)式に代入すると最適反当予備浮力はほぼ0.15 kg で足りる。

しかし，西カムチャッカタラバガニ漁場の最北部に位置するカフラン漁場だけは環境条件が特異である。ここでは潮汐流が強く，その流向と設網線との交角も不定，罹網率が高いが，雌ガニおよび仔ガニの混獲も多く，また底質は礫石で，付着生物が繁殖し[22,23,25]，これが傾斜したカニ刺網の網地にてん絡し網の漁獲能力を低下させるので予備浮力を大きくする必要がある。カフラン水域でカニ刺網の倒伏を防ぐために，カニ刺網の最大許容傾斜を50度および最大流速を1ノットにとると，網地1反の流水抵抗は50kgとなり，流向と設網線との最大交角を90度にとれば，必要な反当予備浮力は42kgにも達する。カフラン湾中央部におけるタラバガニ漁期の最大潮汐流は南西流および北～北東流0.7～0.8ノットであるが，北上するほど潮流が速くなり，ペンジンスキー湾口東部の最大潮汐流は南西流および東北東流1ノット以上に達し，海底には大きな玉石に珊瑚類や巨大なフジツボ類が着生し[22,23]，それらが網地に絡み付き，揚網を不可能にするため，タラバガニの罹網率が高いにも拘わらず，漁業者はカフラン湾北部におけるカニ刺網の操業を極力避けてきた。

実験結果（表7）によれば，平均反当罹網尾数は浮子を12個付けた網で最も多く，浮子結着数が6個の網は18個の網より僅かに多い。ただし，*T*検定によれば，これら平均値間の差は有意ではない。しかし，反当罹網尾数が40尾以上に達している第8調査点では浮子を18個結付した網の漁獲量が浮子を6個結付した網の漁獲量を上廻り，逆に反当罹網尾数が30尾以下になっている第6および第7調査点では浮子結付数6個の網の漁獲量が浮子結付数18個の網の漁獲量を超える傾向が認められる（図6および付表1）。従って，浮子の適正結着数はタラバガニの罹網状況によって若干変り，罹網が非常に多い場合は浮子結付数を若干多くした方がタラバガニの罹網によっても網が海底に伏し難く，漁獲機能が保たれる。これに対し，タラバガニの罹網が少ない場合には浮子数の少ない網が沈子網の離底および網地の張りが少ないため，漁獲能力が高まるものと推察される。図6に示す両調査点の反当罹網尾数は非常に異なるが，夫々留網72時間および120時間以降は反当罹網尾数の増加傾向がなく横這状態となる。この横這傾向は網の漁獲能力が72時間および120時間以降には失なわれたことによって起る現象と考えうる。すなわち，第6調査点では120時間後の揚網時に，タラバガニが網地に二重，三重に絡まっている。これはこの揚網前日までの大時化によって漁獲1尾当りのてん絡網目数が増加し，網の漁獲能力が失なわれたことを示すものと考えられる。一方，第8調査点ではタラバガニへのてん絡網目数が増加する以前の投網直後に多くのタラバガニが罹網したので反当罹網尾数が多いものと考えられる。この様に図6は環境条件がカニ刺網の罹網許容尾数を左右することもある例でもある。

上述の検討から，漁獲能力の向上には，予備浮力は許される限り小さいことが網地のてん絡能力を高める上で必要であり，罹網部位の予備浮力は原料ガニの水中体重（100g以上）以下の方が罹網層より上方の網を漁獲に関与させる上で有効である。また，網地の局部的緊張，浮子間浮子網の垂下および沈子網の離底を少なくすることが漁獲能力の向上に必要であるから，浮子，沈子およびそれらの結付間隔は可及的に小さくし，出来れば永久装着にすることが望ましい。また，網地にはポリプロピレン（比重0.91）など比重の小さい繊維を用いることは網を海底に伏し難くし，とくに海水の流動の激しい場合，海底が岩礁ないしは礫石性で混獲物の多い水域およびタラバガニの罹網の多い時に効果的であろう。

4.3　網糸の太さと漁獲能力との関係

ビニロン20′s 3/21糸の網は綿10′s 3/24糸の網に比し約2倍の漁獲性能を有することは実験結果から明らかである（表8）。

日ソ両国のカニ刺網による漁獲比較によれば，日本のカニ刺網の漁獲性能はソ連のそれの倍である。ソ連網は日本網に比し網糸の他に掛目数，編下し目数，縮結が少し少なく，その他の仕立法にも若干の相異があるが[13]，日本の身網はビニロン20′s 3/21であり，ソ連のそれは綿糸10′s 3/24である。従って，上述の両網の漁獲比較から両国のカニ刺網の漁獲性能の差は網糸の違いに因ることが判る。両糸の漁獲能力に差をもたらす要因としては，既に網糸による選択性を考察する中で両糸の物理的

特性（表10）の差異およびタラバガニの形態と対網生態を検討し，詳述したように，両糸の太さの違い以外は考えられない。ビニロン20′s 3/21糸より網糸の直径が50%長い綿10′s 3/24糸の絡まりにくさが綿糸10′s 3/24の網の漁獲能力をビニロン20′s 3/21の網のそれより低めているとして間違いない。網地資材の有効利用という立場からは操作に支障のない限り細い網糸が優る。しかし，タラバガニ資源の生物生産性の合理的利用という観点からは次の理由により太い網糸が適合している。ビニロン20′s 3/21網の漁獲物組成（表８）は板曳網のそれ（表９）に近似するが，綿糸10′s 3/24網の漁獲物組成（表８）は板曳網のそれより19%だけ雄大型ガニが多く，雄小型ガニが少ないからである。つまり，カニ刺網は網糸の太い方が商品価値のない小型雄ガニを混獲しにくい。

雄大型ガニ（原料ガニ）の採捕に際し，カニ刺網で混獲される雌ガニおよび雄小型ガニなど甲幅が数cmから13cm未満の小型ガニを傷つけることなく網から外し，海中に放すことは操業能率上不可能である。雌ガニは大部分が母ガニで，その混獲死亡の影響が原料ガニの豊度にあらはれるのは，原料ガニの年令から推算して７年以降になろうが，雄小型ガニは自然死亡も少ない５～６才[43,44]以上に達しており１～３年以内には原料ガニになると考えられる。雄小型ガニの混獲防止は，過去の北洋漁場における雄小型ガニの混獲率から，原料ガニの年漁獲許容尾数を30%以上増加させると期待される。従って，カニ刺網に混獲された雄小型ガニおよび雌ガニを傷つけることなく，かつ素早く網地から取外すために，長期間に亘り弾性を保持しうる網糸の開発が待たれる。

5. 結　論

カニ刺網の漁獲性能を支配する主因は網地のてん絡性能である。網地のてん絡性能を左右する要素には網糸の柔軟性，太さ，粘着性，弾性，帯電性の他に網地の脚数（目合および縮結）と張り（予備浮力とその分布）がある。網地はてん絡に適した構造であるが，てん絡至適条件を具備していれば，それが網状である必要はない。例へばクモの糸のように粘着性を有する場合は物に絡み付き易い反面，縺れ易さのため刺網類のように縮結を多く入れたり，張りを弱めたりしててん絡性を良くすることは出来ず，クモの巣のようにピンと張りめぐらし，それに因るてん絡能力の減少は糸の弾性と粘着力によって補ぎなわねばならぬ。糸の弾性には罹網した動物の取外しを容易にする利点がある。それがカニ刺網の場合には原料ガニの採捕に伴う雌ガニおよび仔ガニの混獲死亡を減少せしめうる可能性をもつ要素となり，とくに雄仔ガニでは自然死亡も少ない５～７才以上に達しており３年以内に原料ガニになると考えられるので資源の生物生産性の有効利用となる。また，網糸が太くなることによるてん絡能力の減少は小型ガニに対して著しい。従って，これは雌ガニ，仔ガニの混獲防止に応用しうる。このような省資源的漁獲手段に対する要望は高まりつつある。資源の生産性の合理的利用に合致した適正漁法の開発は今後漁具漁法学が指向すべき研究課題であり，解決すべき多くの問題が残されている。

一般に漁獲能力を高めるには網糸を細く，かつ背景に似た色彩にするのが良い。タラバガニが色彩にコントラストのある運動体にのみ視覚的に反応する機能特性を有するとしても水深が50m以上に達する海底の照度は１ルックス以下であるから，その要因は糸が細くなるほど絡まり易くなることにあると考えられる。タラバガニは嗅覚が鋭どい。このことから一部の漁業者はカニ刺網にタラバガニの餌や雌ガニの卵巣を付加して臭による誘引を試みたが，漁獲効果はあがっていない。しかし，雌ガニの性ホルモンによる原料ガニ（成熟雄ガニ）の選択的漁獲は興味をひく研究課題である。

網地のてん絡性能を左右する要素としては網地の張りの強さと脚数がある。網地の張りは可及的に弱い方がてん絡性能が良い。浮子と沈子は細分化し，永久装着にした方が操業上有利である。しかし，流れが速かったり，海底が岩石であったりあるいは罹網するタラバガニが多い場合には網が海底に伏して漁獲性能を失わぬよう予備浮力を増大する必要がある。網地の脚数は多いほどてん絡能力が高まり，脚当り漁獲能力は反当脚数6,720本位で最高に達し，単位網地量当り漁獲能力は目合が30.0cmまで縮小するほど増加するので，網地資材の合理的利用上は現在より目合を縮小することが妥当である。なお，目合30.0cmまでの縮小は雌ガニおよび仔ガニの混獲率増加をともなわぬから資源の有効利用上からも問題はない。

謝　辞

本研究は北海道大学水産学部佐藤　修教授の御懇篤なる指導のもとにまとめられたものである。ここに深謝の微意を表する。なお，本論文は北大水産学部上野元一教授ならびに同川島利兵衛教授の御校閲をいただいた。併せて深謝の意を表する。

本研究に用いた貴重な資料はその多くのものが函館水産高等学校練習船北鳳丸により得られたものである。北洋漁場において長期間にわたり漁獲試験の遂行に著者と

労苦を共にした同船の金盛金蔵船長以下乗組員の方々に厚く御礼申上げる。また，マイラーバルーンを御紹介下さった気球製作所河野寿雄参事，カニ刺網の各種模型を製作された泰東製綱技術開発部の各位，北洋における調査に格別の便宜と援助を与えて下さった北洋水産白根山丸，日魯漁業開洋丸，大洋漁業白洋丸および日本水産洋光丸の各船団長以下各位に感謝する。

おわりに，本研究をすすめるに当って絶えざる激励と御指導を賜った元北大水産学部斎藤市郎教授（現在北洋水産顧問）に謹んで深謝の意を捧げる。

文献

1) 佐藤　栄（1958）：タラバガニの発育並びに漁業生物学的研究，北水研報告，17

2) 佐藤　栄（1949）：タラバガニと其の漁業，北方出版社，札幌。

3) 岡本正一（1944）：蟹缶詰発達史，東京。

4) 岡本正一（1944）：漁業発達史，蟹缶詰篇，霞ケ関書房，東京。

5) 岡本信夫（1965）：近代漁業発達史，水産社，東京。

6) 水産庁（1965）：世界水産総覧，東京。

7) 水産庁海洋漁業部国際課（1975）：昭和49年度かに漁獲統計，東京。

8) 水産庁海洋漁業部国際課（1979）：昭和54年度かに，つぶ統計関係資料，東京。

9) 丸川久俊（1933）：たらばがに調査，水産試験場報告，4。

10) 加藤重遠（1937）：調査研究報告，Ⅱ。潜水調査（蟹漁業），日魯漁業株式会社。

11) 笹川康雄（1963）：かに刺網における漁具構造と漁獲性能との関係，北水研報告，30。

12) 薬室親正（1962）：カニ底刺網に対する自記式網深さ計並びに自記式網高さ計の応用計測について，漁船研技報，8。

13) 谷野保夫，笹川康雄（1962）：日ソ両国刺網の比較試験，かに資研報，2。

14) Farran G.P.(1936): On the mesh of herring drift-net in relation to the condition factor of the fish, J. du Conseil, (1).

15) 椎野季雄（1964）：動物系統分類学，7。中山書房，東京。

16) Waterman T. H. (1961); The physiology of Crustacea, 2, Academic Press, New york.

17) 西村　実（1966）：水中テレビの実用化に関する研究―Ⅱ，ヒトデ発生地，定置漁場ならびにタラバガニ漁場における実験，漁船研技報，20（4）。

18) 武富　一（1969）：水中テレビおよび水中マイクロホンによるタラバガニ生態観察について，水産庁調査研究部，東京。

19) Sasakawa Y. (1973) : Studies on the tangle net for king crabs-1.0n spacific gravity and hydraulic resistance of edible crabs, Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab. 74.

20) 大垣光平・池田九八（1934）：カムチャッカ西海岸に於ける測流，測温結果について，水産研究彙報，4，北大水産専門部。

21) 須田完次（1934）：カムチャッカ西沖の潮流について，水産研究彙報，4，北大水産専門部。

22) 前田辰昭（1958）：カムチャッカ西海岸に於ける底曳漁場に就て，北大水産彙報，9（2）。

23) 笹川康雄（1962）：カムチャッカ西岸沖合の海底と春夏季海況（1957～1962），かに資研報，1。

24) 笹川康雄（1973）：続〝かに〟とその漁法，さかな（東海水研業績C），10。

25) ゴルデエワ　カ・テ（1948）：西カムチャッカ大陸棚上に於ける底棲動物の量的研究資料，大平洋漁業海洋学研究所報告，26（半井四郎他4名和訳，ソ連北洋漁業関係文献集，25，北資研協会，1958）。

26) 竹之内彦四郎（1935）：「タラバ」蟹調査報告書，農林省水産局。

27) 梶田与之亮，中川数一（1932）：鱈場蟹調査，水産調査報告，第27冊，北水試。

28) 中沢毅一（1912）：北海道タラバガニの研究，動物学雑誌，24（279）。

29) 酒井　恒（1971）：2新種を含むたらばかに科15種の解説，甲殻類の研究，4，5。

30) 三善清旭（1938）：網糸の剛さ，日水誌，3（3）。

31) ラグノーフ　イ.イ.（1970）：カムチャッカ沿岸における水中観測の若干の結果，大平洋漁業海洋学研究所報告，73（宇田久美子和訳，ソ連北洋漁業関係文献集，96，北資研協会，1972）。

32) Shishkova E. V., A. S. Mikolae i 1. 1. sizov (1971): Shumui Kamchatskih krabov, Ruibnoe Hozyastvo, 1971-3.

33) 間庭愛信，畠山良己（1976）：音響による魚群の誘致，威嚇に関する研究　漁船研技報，29。

34) 宮本秀明（1934）：刺網類の余剰浮力と網地の張力，日水誌3（1）。

35) 野村正恒（1961）：刺網の研究―Ⅰ，刺網の漁獲作用と漁具に対する魚群の行動，東海水研報告，30。

36) Nomura M. and Yamazaki T. (1975): Fishing Technics, Japan International Cooperation Agency, Tokyo.

37) 近藤 仁 (1962) :網地および網漁具における張力分布に関する研究，東水大特研報，5。

38) Takenouti Y. (1936) : The nature of the fishing net and it's application to the brand break of the net -1, Bull. Soc. Fish., 4(3).

39) Kawakami T. (1964) : The theory of designing and testing fishing nets in model, Modern fishing gear of the world, 2, Fishing news Ltd, London.

40) Fridman A.L. (1961) : Theory and Design of Commercial Fishing Gear. the Ministry of Higher and Secondary Education of the RSFSR, Moskva (Translated from Russian by R. Kondor, Jerusalem, 1973).

41) 笹川康雄 (1975) :かに刺網に関する研究ーⅡ，予備浮力の分布型，東海水研報告，83。

42) Tauti M. (1934) : The force action on the plane net in motion through the water, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 3(1).

43) Weber D.D. and T.Miyahara(1962): Growth of the adult male king crab. *Paralithodes camtschatica* (Tilesisu), U.S. Fish and Wildl. Serv., Fish. Bull., 62.

44) Weber D.D.(1967): Growth of the immature king crab *Paralithodes camtschatica* (Tiesius), I.N.P.F.C., Bull., 21.

Studies on Fishing Efficiency in Relation to Structure of King Crab Tangle Nets

By

Yasuo SASAKAWA

Summary

Tangle net operation on king crabs, *Paralithodes camtschatica* (Tilesius) and blue king crabs, *Paralithodes platypus* Brandt which had been initiated in the coastal waters of Hokkaido in 1907 expanded all over the Northern seas of Japan in accordance with introducing of powered fishing boats and mechanization of fishing equipments, especially succesful operation of factory-mothership system with Japaness fishermen's hard work.

After The World War Ⅱ, the catch hastily increased again since the fishing was resumed in 1953. But after 1958, the annual allowable catch of king crabs for Japan was reduced drastically year by year in international relations to king crab resources. At last it was prohibited complitly for Japan in 1975 to catch in the Okhotsk sea and the Bering sea. Although many fishery technical progresses were made in the course of development in the fishery, king crab tangle nets in spite of having some demerits, changed little except the shift of material of netting from cotton to synthetic fiber.

Concerning researches on king crab tangle nets, a fishing experiment of the nets with three different shrinkages and with three different mesh sizes by Marukawa (1933), and diving observation of behaviour of king crabs and configuration of the net by Kato (1937) were carried out. But as far as shown in Marukawa's table the result of the fishing experiment is indistinct. Kato's record is indicative an actual state of configuration of nets and a behaviour of king crab on fishing ground. After The World War Ⅱ, fishing efficiency of Japan and U S S R nets by Tanino and the author (1962), configuration of the net by Hamuro (1962), fishing efficiency in relation to the gear structures by the author (1963) and distribution pattern of spare buoyancy by the author (1975) are reported.

The thesis in the first aims to clarify the fishing efficiency of the nets differed in structure, the distribution of spare buoyancy on king crab tangle nets and the related physical properties, and in the latter the author focused on important factors to explain the mechanism which the fishing efficiency changes with a structural differenciation of a king crab tangle net, from the standpoint of not only physical properties of the net but also biological characteristics of the king crab and

environmental aspects of fishing ground. Through this study, an elucidative conclusion is given on the fishing mechanism of a king crab tangle net and that is also instructive to utilze effectively the biological productive potential of king crab stocks, as follows.

I. Distribution of spare buoyancy, mesh opening and tention in bar

Using a commercial model net (0.62 in shrinkage) and a basic model net (0.33 in shrinkage) which are set up with polyester balloons filled helium gas on the ground or with float in water bottom, the distribution of the spare buoyancy b_1, the propagating mechanism of the buoyant force of balloon B_f to variuos parts of the net, the distrbution of mesh depth C and width A and tension T in bar are obtained by the distribution of the weight of static load L_i which lower the part imposed for just 10 cm and the maximum widths and depth of meshes.

1. Distridution of spare buoyancy

At first the distribution pattern of spare buoyancy and the propagating mechanism of the buoyant force of balloonm to the variuos parts of the net are clarifyed on the basic model net. The spare buoyancy on float line decreases with departing from the joining position of balloons, and has the maximum value beneath balloon, and the minimum value at the middle between balloons. As the spare buoyancy of float line propagates along the oblique bar line which comes at an angle with respect to the float line, the magnitude of spare buoyancy of each oblique bar line corresponds to the spare buoyancy at the joining position with float line.

The area such as a upside-down triangle with small spare buoyancy centering at the middle of the base is formed in the upper layer of the interval between the joining position of balloons and cosists of the oblique bar lines with small spare buoyancy. The knot with the maximum spare buoyancy where the oblique bar lines with large spare buoyancy intersect each other appears under the vertex of the upside-down triangle mentioned above.

Distribution pattern of spare buoyancy of commercial model net principally agrees with that of basic model net. However, in the case of the former it is evident that the area with large spare buoyancy is limited in the lower area of balloon, and the area with small spare buoyancy which centers at the top knot of the middle between the joining position of balloons distributes in the lines becomes steeper as mesh opening (directing upward and downward) becomes narrower. When the spare buoyancy b_f of each balloon attached to a commercial model net set perpendicularly up on the ground changes from 0 g to 5 g by a gram. The static load L_f which lower float line for 10 cm at a joining position with balloon is approximated by the following experimental equation.

$$L_f = B_f - 2 = b_f + 1.5$$

$$\Delta L_f = \Delta b_f = \Delta B_f$$

where Δ is the small varying quantity.

Therefore, spare buoyancy b_i at an arbitrary position of the model net and that

${}_pb_i$ of the full scale net set up on water bottom are calculated by the following formula respectively.

$$b_i=b_f+L_i-L_f=2.1+L_i-3.3=L_i-1.2 \quad\cdots\cdots (7)$$

$$ {}_pb_i=b_i\cdot {}_pb_f/b_f=b_i\cdot 136.8/2.1=65b_i \quad\cdots\cdots (8)$$

The spare buoyancy on the full scale net ranges from −20 g to 182 g, which are large in a trianglar area under the float and are small in an interval between the floats, the area with minus spare buoyancy centering at the middle of the base forms a shape such as upside-down triangle. Spare buoyancies at knots in the lower layer of the netting where king crabs encounter and touch are 52–111 g in middle parts between floats but in the area under floats where buoyant force of float concentrates are 130–169 g, which are superior the under water body weight of female and young male crab smaller than 150mm in carapace width.

2. Distribution of mesh width and depth

As the configuration of the model net set up on the ground is apparently almost similar to that on water bottom, the mesh depth and width of full scale net set up on water bottom are approximately given by 19.23 times those of the enlarged photograph of the former in the ratio between both them. The vertical and horizontal maximum expansions of a mesh are applied as mesh depth and width respectively. The mesh widths range from 86 mm to 288 mm, and the mesh depth range from 229 mm to 496 mm when the net set perpendicularly up. Mesh widths are narrow in the triangular areas under floats and are wide in the upside-down triangular areas in intervals between floats, corresponding the distribution of spare buoyancy at knot of netting.

The shapes of the meshes located in the boundary of the both areas are remarkably deformed. However, under floats and in middle parts between floats, the mesh depth and width are coincide with the distances between right and left or top and bottom knots of the mesh. The mesh widths of the lower layer of the netting where king crabs enouter and touch are 104–264 mm, and mesh depths there are 232–480 mm when the net sets perpendicularly up. Mesh widths are narrow and mesh depths are deep under floats, and mesh widths are wide and mesh depths are shallow in middle part between floats.

3. Tension in bar

The tension in the bar T under a float and in middle part between floats is given by the following equation.

$$T={}_pb_i/2\cos\phi={}_pb_i\cdot l/C \quad\cdots\cdots (9)$$

where l is the length of the bar, and ϕ is mesh opening angle directing vertically.

The tension in bars are large ranging from 78 g to 130 g under floats and are small ranging from −12 g to 69 g in middle part of floats. Particularly in the upper layer of the middle part, the netting is slack and tensions of bars are negative on calculation. It is estimated that tension in bars in lower layer of netting where king crabs encounter and touch are 97 g at the most.

1. Fishing efficiency in relation to gear structures

The fishing efficiency of the tangle net for the king crab larger than 60 mm in carapace width was examined with the nets differed in their structure, mesh size (303–758 mm), shrinkage (0.3–0.8), net cord (cotton 10′s 8/X 3/S and vinylon 20′s 7/X 3/Z) or number of floats per tan (6–18). Each experimental net was set alternately by tan (44–47 m) in the king crab fishing ground off the west coast of kamchatka peninsula. Conclusions obtained are summerized as follows on selectivity for the size of king crabs and fishing ability of king crab tangle nets.

1. Selectivity for the size of king crabs

1) Mesh selectivity

Mesh selectivity was not vary with all the differences of mesh size and shrinkage of the net. Judging from walking posture and external feature of king crabs, this is due to that king crabs have not been able to pass through a mesh without tangle in the netting, as a result that the mesh width decrease by less than the total length of carapapace width and both length of 3rd meropodite of a knig crab. Such a decrease of mesh width results from that a float line is pulled up at the positions with floats and hang down in the middle parts between floats, and partial tension and slackening of netting increase by entangles of king crabs.

2) Selctivity by the thickness of net cord

In catch composition the ratio of large male crab, over 13 cm in carapace width, caught by the net with vinylon 20′s 7/X 3/Z netting is more 17 percent in an average than that of the net with cottonn 10′s 8/X 3/S netting. This is significant difference between the two. According to the size distribution, individual number caught with the net of cotton 10′s 8/X 3/S is fewer in the carapace width under 145 mm than that of the net of vinylon 20′s 7/X 3/Z. But the average of carapace width is no significant difference between the two.

Physical properties of vinylon fiber is the most resemble to cotton fiber among synthetic fibers. Cotton 10′s 8/X 3/S twine is more thicker by 50% in diameter than vinylon 20′s 7/X 3/Z twine. A thin twine entangle on objects in easy more than a thick twine, especially for a small king crab which the power of entangling in net for itself is weak comparing with a large king crab. It is estimated that the difficulty of entangling of thick cotton 10′s 8/X 3/S to small crabs produces the difference of the selectivity between both twines.

2. Fishing ability

1) Number of bar

Number of catch per tan n increases exponentially as the mesh size M decreases and the shrinkage S increases.

$$\log n = 0.512 + 0.0130\ S$$

$$n = 3.25\ e^{0.0299\ S} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\log n = 2.0060 - 0.0180\ M$$

$$n = 101\ e^{-0.0415\ M} \quad \cdots\cdots (2)$$

It is clear that the regression coefficient between mesh size or shrinkage and number of catch per tan are almost agreed with that between mesh size or shrinkage and number of bar per tan. This fact indicates that increase of fishing ability with increment of shrinkage or decrease of mesh size is due to increase of bar which entangles in the king crab encountered a net.

Relation between number of catch per tan and number of bar per tan τ is formulized as the follow :

The case of various meshes in the shrinkage of 0.602.

$$\log \tau = 2.366 + 0.0350\, n \qquad (11)$$

$$n = \log \tau - 2.366/0.0350 \qquad (12)$$

The case of various shrinkages in the mesh size of 500 mm.

$$\log \tau = 2.401 + 0.0209\, n \qquad (13)$$

$$n = \log\tau - 2.401/0.0209 \qquad (14)$$

Fishing abiity per bar is the maximum when the number of bar is 4 pieces which touch to an average sized king crab (13 cm in carapace width) encountered the net that is set perpendiculary up, 0.6 in shrinkage, 500 mm in mesh size and about 6,240 pieces in number of per tan.

Since selectivity for size of king crabs is not vary with all the difference of mesh sizs or shrinkage of the net. While catch per unit weight of netting increases remarkably by the reduction of mesh size, that decreases by the increment of shrinkage. Therefore, the reduction of mesh size is advisable from the economical use of netting materials, and there is not any problem from the aspect of effective utilization of the biological productivity of king crab stocks too.

2) Number of floats

In the average, number of catch per tan of the net with 12 floats per tan was the most while that of the net with 6 floats was a little more than that of the net with 18 floats. These are no significant difference among the three. Anyhow suitable number of float attached is vary a little according to the number of king crabs entangled in the net and the condition of fishing ground. It is deduced from the present study that the number of floats to be attached is related to fishing ability of the net as flows,

i. The state of a net with many floats

The king crab tangle net becomes hard to lie on sea bottom and keeps fishing ability. On the other side the tension of the netting increases. Particularly under floats, sinker line between sinkers floats up some from sea bottom, and tangle of king crabs in netting is hard to proceed. Because buoyant force of a float concentrats there, where spare buoyancy at knots in the lower layer of the netting are 130–169 g which are superior the under water body weight of a king crab smaller than 150 mm in carapace width.

ii. The state of a net with a few floats

King crabs become easy to be entangle in king crab tangle nets owing to the decrease of tension of netting, and float line dose not apart from sea bottom. On the other hand the net is easy to lie on the sea bottom and to lose fishing ability by the increase of king crabs entangled in net or strong current on rough sea bottom.

3) Thickness of net cord

The number of catch per tan of the net with vinylon 20′s 7/X 3/Z netting was twice as many as that of the net with cotton 10′s 8/X 3/S netting. This result originates in less entangling efficiency of thick cotton 10′s 8/X 3/S twine to king crabs especially smaller than 145 mm in carapace width, as comparing with that of thin vinylon 20′s 7/X 3/Z twine.

付表 1 試験網の反当罹網尾数および漁獲物組成

Appendix table 1. Catch per tan and catch compositon of experimental nets

Name of net	No. of fishing	Date of net haul	Catch per tan				Catch composition		
			Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
B	1	Aug. 3	20.2	2.0	2.3	24.5	82	8	9
〃	2	6	14.0	10.4	0.2	24.6	57	42	1
〃	3	9	8.5	20.4	7.5	36.6	23	57	20
〃		Mean	15.1	9.6	3.0	27.6	55	35	11
A	1	Aug. 3	11.9	2.5	2.4	16.8	71	15	14
〃	2	6	4.5	2.3	0.1	6.8	65	34	1
〃	3	9	4.6	9.0	2.5	16.1	29	56	16
〃		Mean	8.0	3.9	1.7	13.6	59	29	13
C	1	Aug. 3	5.8	0.5	2.0	8.3	70	6	24
〃	2	6	2.0	1.8	0.1	3.9	51	47	2
〃	3	9	3.3	6.7	3.2	13.3	25	51	24
〃		Mean	3.5	3.0	1.6	8.2	43	37	20
D	1	Aug. 3	2.7	0.7	1.0	4.3	62	15	22
〃	2	6	1.0	0.5	0.2	1.7	60	30	10
〃	3	9	1.2	4.0	1.5	6.7	18	60	23
〃		Mean	2.1	1.3	0.9	4.2	49	30	22
E	4	May. 3	0.6	0.2	0.2	1.0	61	20	20
〃	〃	5	2.0	0.2	0.8	3.0	67	7	27
〃	〃	6	2.4		0.6	3.0	80		20
〃	〃	7	1.2		0.2	1.4	86		14
〃	5	31	5.4	0.4	3.2	9.0	60	4	36
〃	〃	31	8.2	0.6	2.0	10.8	76	6	19
〃	〃	Jun. 1	11.2	2.4	5.6	19.2	58	13	29
〃	〃	1	5.0	0.8	3.2	9.0	56	9	36
〃	6	15	3.0	2.3	1.0	6.3	48	36	16
〃	〃	15	2.8	2.3	2.0	7.0	39	32	29
〃	7	18	0.8	0.3		1.0	75	25	
〃	〃	19	0.3	0.8	0.3	1.3	20	60	20
〃	〃	20	1.0	1.0	0.3	2.3	44	44	11
〃	〃	21	3.0	0.8	0.3	4.0	75	19	6
〃	8	Aug. 1	9.0	25.7	12.3	47.0	19	55	26
〃	〃	1	4.0	17.3	3.3	24.7	16	70	14
〃	9	Jul. 30	1.8	0.3	0.4	2.4	74	11	16
〃		Mean	3.6	2.4	1.9	7.8	46	30	24

Appendix table. (continued)

Name of net	No. of fishing	Date of net haul	Catch per tan				Catch composition		
			Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
A	4	May. 3	1.0			1.0	100		
〃	〃	5	9.0	0.6	0.8	10.4	87	6	8
〃	〃	6	12.0	0.2	0.8	13.0	92	2	6
〃	〃	7	10.8		0.5	11.3	96		4
〃	5	31	8.5	1.5	5.5	15.5	55	10	36
〃	〃	31	14.3	0.7	9.7	24.7	58	3	39
〃	〃	Jun. 1	18.0	3.3	4.8	26.0	69	13	18
〃	〃	1	9.8	0.6	6.4	16.8	58	4	38
〃	6	15	19.0	13.5	3.5	36.0	53	38	10
〃	〃	15	22.3	12.5	4.8	39.5	56	32	12
〃	7	18	2.0	1.3	0.8	4.0	50	31	19
〃	〃	19	5.5	3.0	0.3	8.8	63	34	3
〃	〃	20	6.0	2.3	0.5	8.8	69	26	6
〃	〃	21	9.5	9.3	1.3	20.0	48	46	6
〃	8	Aug. 1	23.0	49.3	17.7	90.0	26	55	20
〃	〃	1	13.3	59.0	16.3	88.7	15	67	18
〃	9	Jul. 30	2.4	1.6	1.3	5.3	46	30	24
〃	Mean		10.2	7.4	3.7	21.3	48	35	17
A′	6	Jun. 8	1.5	0.3	0.3	2.0	75	13	13
〃	〃	12	9.8	15.0	3.8	28.5	34	52	13
〃	〃	13	15.3	10.3	4.5	30.0	51	34	15
〃	〃	14	10.3	9.3	3.3	22.8	45	41	14
〃	〃	16	13.3	12.8	4.8	30.8	43	42	15
〃	7	20	5.8	2.5	0.5	8.8	66	29	6
〃	〃	20	12.5	5.8	2.3	20.5	61	28	11
〃	8	Jul. 25	11.8	30.0	12.0	53.8	22	56	22
〃	〃	27	8.0	44.0	10.5	62.5	13	70	17
〃	〃	28	17.5	44.8	7.0	69.3	25	65	10
〃	〃	Aug. 1	18.8	35.0	11.0	64.8	29	54	17
〃	〃	1	16.8	38.3	12.3	67.3	25	57	18
〃	〃	2	17.5	41.8	12.8	72.0	24	58	18
〃	Mean		12.5	22.1	6.5	41.0	30	54	16

Appendix table. (continued)

Name of net	No. of fishing	Date of net haul	Catch per tan				Catch composition		
			Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
F	4	May. 3	4.2	0.2	0.6	5.0	84	4	12
〃	〃	5	17.0	0.6	0.8	18.4	92	3	4
〃	〃	6	17.2	0.8	0.8	18.8	92	4	4
〃	〃	7	37.3	1.8	2.3	41.3	90	4	6
〃	5	31	15.0	5.2	4.0	24.2	62	22	17
〃	〃	31	19.8	3.3	7.3	30.3	65	11	24
〃	〃	Jun. 1	24.4	5.2	9.6	39.2	62	13	25
〃	〃	1	20.2	3.4	10.4	34.0	59	10	31
〃	6	5	30.5	12.5	5.5	48.5	63	26	11
〃	〃	5	29.3	22.0	6.3	57.5	51	38	11
〃	7	18	9.5	3.5	2.0	15.0	63	23	13
〃	〃	19	16.0	13.3	2.3	31.5	51	42	7
〃	〃	20	17.3	12.0	4.5	33.8	51	36	13
〃	〃	21	27.3	27.0	1.8	56.0	49	48	3
〃	8	Aug. 1	20.7	49.7	13.3	83.7	25	59	16
〃	〃	1	21.1	71.4	15.4	108.0	20	66	14
〃	9	Jul. 30	6.0	0.9	3.4	10.3	59	9	33
〃	Mean		18.3	11.1	4.9	34.4	53	32	14
G	6	Jun. 8	3.5	1.2	0.3	5.0	70	25	5
〃	〃	12	9.8	12.2	3.5	25.5	26	48	14
〃	〃	13	14.7	7.0	5.3	27.0	54	26	22
〃	〃	14	11.3	10.5	2.3	24.0	47	44	9
〃	〃	16	12.3	8.8	3.0	24.0	51	37	13
〃	7	20	10.3	8.0	1.8	20.0	51	40	9
〃	〃	20	11.8	11.3	1.0	24.0	49	47	4
〃	8	Jul. 25	10.0	26.8	7.5	44.0	23	61	17
〃	〃	27	13.5	43.0	10.3	66.8	20	64	15
〃	〃	28	12.3	27.0	9.5	48.8	25	55	19
〃	〃	Aug. 1	15.3	34.0	9.3	58.5	26	58	16
〃	〃	1	10.0	18.8	6.0	34.8	29	54	17
〃	〃	2	8.8	32.5	4.0	45.3	19	72	9
〃	Mean		10.5	18.5	4.8	33.9	31	55	14

Appendix table. (continued)

Name of net	No. of fishing	Date of net haul	Catch per tan				Catch composition		
			Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
H	6	Jun. 8	1.0	0.8		1.8	57	43	
〃	〃	12	5.5	6.2	3.5	15.3	36	41	23
〃	〃	13	6.5	2.5	1.5	10.5	62	24	14
〃	〃	14	6.0	7.0	2.5	15.5	39	45	16
〃	〃	16	5.8	4.5	2.0	12.3	47	37	16
〃	7	20	1.8	1.0	0.3	3.0	58	33	8
〃	〃	20	6.3	2.8	1.3	10.3	61	27	12
〃	8	Jul. 25	14.3	21.8	12.5	48.5	29	45	26
〃	〃	27	10.3	38.5	10.3	59.0	17	65	17
〃	〃	28	14.0	32.8	5.5	52.3	27	63	11
〃	〃	Aug. 1	21.3	39.8	10.0	71.0	30	56	14
〃	〃	1	18.5	25.8	4.8	49.0	38	53	10
〃	〃	2	17.3	35.0	11.5	63.8	27	55	18
〃		Mean	15.9	32.3	9.1	57.3	32	53	16
K	4	May. 3	0.8		0.6	1.4	57		43
〃	〃	5	5.6	0.4	0.4	6.4	88	6	6
〃	〃	6	7.2	0.4	0.2	7.8	92	5	3
〃	〃	7	8.4	0.2	1.0	9.6	88	2	10
〃	5	31	7.8	0.2	2.2	10.2	77	2	22
〃	〃	31	9.0	1.0	2.5	12.5	72	8	20
〃	〃	Jun. 1	11.2	0.4	3.0	14.6	77	3	21
〃	〃	1	6.0		1.6	7.6	79		21
〃	6	15	10.5	2.3	1.0	13.8	76	16	7
〃	〃	15	11.3	3.5	1.5	16.3	69	22	9
〃	7	18	1.5	0.5	0.3	2.3	67	22	11
〃	〃	19	3.5	2.3	1.3	7.0	50	32	18
〃	〃	20	7.0	1.0	1.0	9.0	78	11	11
〃	〃	21	7.0	2.3	0.5	9.8	72	23	5
〃	8	Aug. 1	15.7	18.0	5.3	39.0	40	46	14
〃	〃	1	19.0	19.5	5.0	43.5	44	45	12
〃	9	Jul. 30	1.3	0.6	0.3	2.1	60	27	13
〃		Mean	7.4	2.5	1.5	11.4	65	22	13

付表 2　板曳網1浬曳網当り漁獲尾数および漁獲物組成

Appendix table 2. Number of catch per mile dragging and catch composition of Itabiki ami

No. of fishing	Date of net haul	Number of cacth				Catch composition		
		Large male	Small male	Female	Total	Large male	Small male	Female
4	May. 3	10	1		11	91	9	
〃	3	8		1	9	89		11
〃	5	17		2	19	89		11
〃	5	13		2	15	87		13
〃	6	19	1		20	95	5	
〃	8	22		1	23	96		4
〃	Mean	15	0.3	1	16	92	2	6
6	Jun. 8	6	12	3	21	29	57	14
〃	14	4	16	2	22	18	64	18
〃	14	8	20	10	38	21	53	26
〃	Mean	6	16	5	14	22	59	19
7	Jun. 18	26	11	4	41	63	27	10
〃	18	57	40	7	104	55	38	7
〃	19	35	27	3	65	54	42	5
〃	Mean	39	36	5	70	56	37	7
8	Aug. 2	16	49	20	85	19	58	24
〃	2	5	44	9	58	9	76	16
〃	Mean	10	47	15	72	15	65	20
6－8	Mean	19.6	27.4	7.3	54.3	36	50	14
4－8	Mean	17.5	15.8	4.6	37.9	46	41	13

水産工学研究所の機構及び所在地

所長	茨城県鹿島郡波崎町海老台	電話　04794(4)4961
庶務課	同　上	同　上
水産土木工学部	同　上	同　上
漁船工学部	東京都中央区勝どき5—5—1	03(531)7741
漁業生産工学部	同　上	03(533)2944
勝どき庶務分室	同　上	同　上

ORGANIZATION OF
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES ENGINEERING
FISHERIES AGENCY

Diretor General
Ebidai, Hasaki-machi, Kashima-gun, Ibaraki, Japan

General Administration
do.

Aquaculture and Fishing Port Department
do.

Fishing Boat and Instrument Department
5-1, Kachidoki 5-chome, Chuo-ku, Tokyo, Japan

Fishing Gear and Methods Department
do.

General Administration Kachidoki Branch
do.

水産工学研究所報告　第3号

昭和57年3月10日　印　刷
昭和57年3月20日　発　行

水産庁　水産工学研究所
茨城県鹿島郡波崎町海老台（郵便番号 314—04）

発行者　土屋　孟
印刷所　統計印刷工業株式会社
印刷者　輿石　博

水産工学研究所組織図

所長
- 庶務課
  - 庶務係
  - 会計係
  - 用度係
- 水産土木工学部
  - 環境分析研究室
  - 環境改変研究室
  - 漁場水理研究室
  - 漁場施設研究室
  - 漁港水理研究室
  - 漁港施設研究室
- 漁船工学部
  - 船体性能研究室
  - 船体構造研究室
  - 漁船機械研究室
  - 電子機器研究室
  - 音響機器研究室
  - 海洋測器研究室
- 漁業生産工学部
  - 漁具研究室
  - 漁法研究室
  - 漁獲性能研究室
  - 魚群制御研究室
  - たか丸
  - (勝どき庶務分室 庶務係)

NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING

Director General
- General Administration
- Aquaculture and Fishing Port Engineering Department
  - Environment of Fishing and Harvesting Ground Laboratory
  - Improvement of Fishing and Harvesting Ground Laboratory
  - Hydraulics on Aquaculture Laboratory
  - Facilities for Aquaculture Laboratory
  - Hydraulics on Fishing Port Laboratory
  - Facilities for Fishing Port Laboratory
- Fishing Boat and Instrument Department
  - Ship Performance Laboratory
  - Hull Construction Laboratory
  - Engine and Machinery Laboratory
  - Ocean Electronics Laboratory
  - Underwater Acoustics Laboratory
  - Oceanographic Instrument Laboratory
- Fishing Gear and Methods Department
  - Fishing Gear Laboratory
  - Fishing Methods Laboratory
  - Analysis of Gear and Methods Laboratory
  - Fish Behaviour Control Laboratory